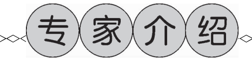
第 41 卷 第 2 期
2024 年 4 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 41 No. 2
Apr. 2024

文章编号:1000-4939(2024)02-0260-28





孙守义,工学博士,西北工业大学力学与土木建筑学院副教授,2023 年入选陕西省高校科协青年人才托举计划,担任 Materials 期刊(IF:3.748,ISSN 1996-1944)客座编辑,中国航空学会、中国力学学会会员。长期从事结构强度寿命评估与抗疲劳制造研究,先后主持某国家重大课题专题、国家自然科学基金、博士后科学基金面上项目等国家和省部级项目,作为骨干人员参与国家重大课题 10 余项。近年来,在 Int J Fatigue、Carbon、Tribol Int、Int J Mech Sci 等力学和机械顶级期刊发表论文 20 余篇,技术发明专利受理、授权 10 余项。2023 年荣获中国造船工程学会科技进步一等奖。

超声滚压金属材料的疲劳性能研究进展

陈辉涛[1,2],豆敏[1],李磊[1],曾延[1],刘露[1],黄威[1],孙守义[1]

(1. 西北工业大学力学与土木建筑学院 清洁高效透平动力装置全国重点实验室,710072 西安;
2. 西北工业大学国家卓越工程师学院,710072 西安)

摘 要:超声滚压(ultrasonic surface rolling,USR)技术结合高能冲击和静载滚压的特点,处理后工件具有表面光洁度高、变形层深、残余压应力大和晶粒细化明显等优势;可通过适当的工艺参数设计,极大提高金属材料的疲劳强度,因而在制造业得到了广泛应用。自该技术应用至今,国内外学者做了大量有关 USR 工艺及性能方面的研究,并在多种重要金属材料及关键零部件中应用。截至目前,关于 USR 工艺参数对材料表面完整性和疲劳性能的研究,比较零散,缺乏系统总结。研究首先简要介绍了 USR 的工作原理和可控性;然后总结了不同 USR 工艺参数诱导的残余应力和微观组织,以及残余应力在疲劳加载过程中的释放规律;分析了不同工艺 USR 诱导的表面完整性对疲劳性能的影响及其潜在机理;阐述了与 USR 相关的复合强化方法的最新进展,并展望了 USR 金属材料的应用前景。

关键词:超声滚压;疲劳性能;金属材料;残余应力;微观组织

中图分类号:TG113;TG306 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2024.02.002

收稿日期:2023-10-12 **修回日期:**2023-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.51975471;11902259;52105154);陕西省重点研发资助项目(No.S2022-YF-QXZD-0023);上海市自然科学基金资助项目(No.21ZR1469300);西北工业大学博士论文创新基金资助项目(No.CX2023053)

通信作者:孙守义,副教授。E-mail:shouyisun@nwpu.edu.cn

引用格式:陈辉涛,豆敏,李磊,等.超声滚压金属材料的疲劳性能研究进展[J].应用力学学报,2024,41(2):260-287.
CHEN Huitao, DOU Min, LI Lei, et al. Research progress on fatigue properties of ultrasonic surface rolled metal materials[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(2):260-287.

Research progress on fatigue properties of ultrasonic surface rolled metal materials

CHEN Huitao[1,2], DOU Min[1], LI Lei[1], ZENG Yan[1], LIU Lu[1], HUANG Wei[1], SUN Shouyi[1]

(1. State Key Laboratory of Clean and Efficient Turbomachinery Power Equipment, School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, 710072 Xi'an, China;
2. National Elite Institute of Engineering, Northwestern Polytechnical University, 710072 Xi'an, China)

Abstract: Ultrasonic surface rolling (USR) technology combines with the characteristics of high-energy impact and static load rolling. The USR-processed workpiece has the advantages of high surface finish, deep deformation layer, large compressive residual stress and obvious grain refinement. It can greatly improve the fatigue strength of metal materials through appropriately adjusting process parameters, thus it has been widely used in manufacturing industry. Since the invention of USR. a large number of studies on processing technologies and mechanisms have been conducted. It is also extensively applied to important metal materials and key parts. So far, the research on the effect of USR process parameters on the surface integrity and fatigue properties is relatively scattered and lacks systematic summary. Firstly, this paper briefly introduces the working principle and controllability of USR. Then, the residual stress and microstructure induced by different USR parameters, and the relaxation of residual stress during fatigue loading are summarized. The effects of surface integrity induced by USR with different parameters on fatigue properties as well as the potential mechanisms are criticized. The combined strengthening methods related to USR are described, and the application prospect of USR metal materials is forecasted.

Key words: ultrasonic surface rolling; fatigue property; metal material; residual stress; microstructure

超声滚压(ultrasonic surface rolling, USR)装置简单、加工路径可控、重复性好,是一种旨在提高金属部件疲劳性能的新兴表面改性技术。它结合高能冲击和静载滚压的特点,能通过抑制疲劳裂纹萌生和扩展来有效延长材料的疲劳寿命[1-2]。在 USR 过程中,超声振动冲击波诱导金属靶材表面的严重塑性变形(severe plastic deformation, SPD),使表面产生高幅残余压应力(compressive residual stress, CRS)、高密度位错和晶粒细化[3]。由于超声振动作用,相比于其他的表面强化方法(如激光冲击、喷丸和传统滚压),USR 可显著降低材料的表面粗糙度,并引入更深的 CRS,从而赋予构件更高的疲劳寿命。据报道,静压力为 380 N 的 USR 在 TC4 表面产生的 CRS 幅值相当于幅值 1 364 N 的传统滚压在相同靶材上的作用效果[4]。因此,了解 USR 的作用原理及运行方式对其强化机制的理解十分关键。

图 1 为处理不同几何尺寸工件的 USR 设备及其示意图。一般而言,USR 系统由超声激振设备、空气静压设备、变幅杆、气缸、变频器以及滚珠组成。这种布局赋予 USR 系统幅值可控的静压力、超声激振以及激振频率,来对常规棒件[5-6](图 1a ~ 1b))和板件[7-8](图 1c ~ 1d)进行表面强化。USR 装置的工作原理可以分解为以下几个部分:超声波发生器先源源不断地发出一定频率的震荡电波;而后,该振荡电能被换能器转化为超声频的机械能;再经变幅杆的传递和放大功能,最终作用到了滚压头上,使其以静压加载和超声振动耦合的方式对材料表面进行强化。而在实际操作过程中,滚压速度和进给量则是由试样夹具通过平移或转动的方式加以调控。一般而言,滚压速度指钢珠的球心相对工件表面运动的线速度;进给量指在一个滚压循环内工件沿垂直于滚压速度方向前进的位移。由图 1 可知,就棒状材料而言,滚压速度 v ($\mathrm{mm \cdot min^{-1}}$)为恒定量,其大小为

$$v = \omega(R - h) = 2\pi n(R - h) \tag{1}$$

式中:ω 为车床主轴的转动角速度,$\mathrm{rad \cdot min^{-1}}$;$n$ 为车床主轴的每分钟转数(即:主轴转速),$\mathrm{r \cdot min^{-1}}$;$R$ 为棒状材料横截面的半径,mm;h 为在滚珠压力作用下棒材表面的平均下压量,mm。而进给量 r(mm)一般以

恒定的进给速度 f ($\mathrm{mm \cdot min^{-1}}$) 来表示，即

$$r = \frac{2\pi f}{\omega} = \frac{f}{n} \tag{2}$$

此时，滚动压头相对于工件表面的运动轨迹为空间螺旋状。当滚压板件材料时，由于在滚压终端(图1d)滚压速度 v 需要完成方向的转变，因此 v 为实时变量，且其大小以平均速度表示，即

$$v = L/t \tag{3}$$

式中：L 为滚压长度，mm；t 为滚珠滚过 L 过程中消耗的时间，min。此时，当钢珠运动到滚压终端时，由于滚压速度为0，进给量 r 在瞬间完成。因此滚动压头相对于工件表面的运动轨迹为平面“之”字形。除了以上两种常规尺寸的工件之外，近期 LAN 等[9]还报道了一种改装版的 USR 系统，用以强化齿轮根部，并使得齿轮疲劳强度提高一倍；其设备和示意图可分别见图1(e)和图1(f)。

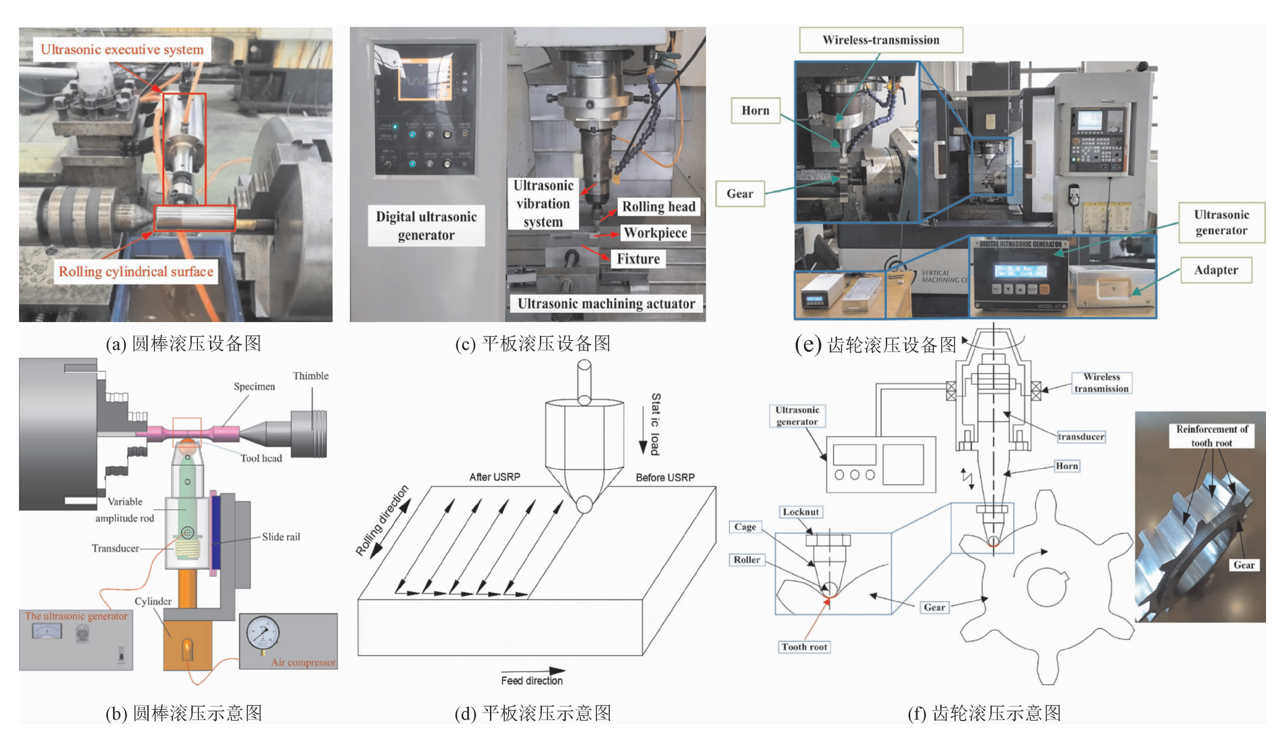


图1 USR 设备图和示意图[5-9]

Fig. 1 Test device and schematic illustration of USR[5-9]

USR 利用高能冲击和静载滚压对工件表面进行强化，可以显著改善材料的抗疲劳性能。任学冲等[10]将 USR 技术应用到 EA4T 车轴钢的加工中，试验结果显示表面改性后，材料表面粗糙度从0.92 μm降低到0.21 μm，微动疲劳寿命提高了近4倍。LIU 等[11]对钛合金进行 USR 强化，发现其表层产生了100～110 μm 的 α + β 晶粒细化层，疲劳寿命最大提高了34.7倍。YANG 等[12]将 USR 用于高温合金 GH4169 的处理，在材料表面引入了高达1 190.2 MPa的 CRS，使得其疲劳寿命提高了约11倍。毛淼东[13]论证了 USR 后 Ti-6Al-4V 合金表面纳米晶粒的形成机制为塑性变形和位错运动主导的晶粒细化过程；且指出该组织以及同时诱导的高幅值 CSR 使得应力控制和应变控制的低周疲劳寿命均有明显的提升；然而，由于发热差异性，未能有效提高其高周疲劳寿命。邹江河[14]通过优化 USR 工艺参数，得到了 40CrNiMoA 钢最深的表面 SPD 层(450 μm)，并使得 CRS 幅值提高至1 251 MPa；从而将材料微动疲劳极限提高了66.7%。相反，在王震[15]的研究中却发现，过度的 USR 在试样中诱导了残余拉应力，导致疲劳过程中内部裂纹快速萌生和扩展，使得拉压疲劳性能降低；同时，该不利的应力状态结合扭转剪切应力改变了扭转疲劳裂纹萌生模式，导致疲劳扭转过程中裂纹多点萌生，显著降低扭转疲劳性能。上述研究指出，金属材料疲劳的 USR 强化机制主要归因于表面形貌、表层微观组织、残余应力等因素的协同作用，具体包括以下几个方面：①表面粗糙度降低，表面硬度增大，增强了表面抗磨损性能；②表层的位错增殖和组织细化，提高了滑移变形抗力，抑制了滑移带的产生；③较大的 CRS 阻

碍了疲劳裂纹的萌生和早期扩展,降低了裂纹扩展速率。由此可见,USR 下表面质量变化是提升结构抗疲劳性能的重要原因,是解析材料疲劳 USR 强化机制的重要突破点。此外,过度的 USR 也会对金属材料疲劳性能产生有害影响。因此,USR 工艺参数的优化对疲劳性能的提升意义重大。

USR 强化效果与静压力、超声振幅、进给量、滚压次数等工艺参数密切相关,主要体现在强化后 CRS、表面粗糙度、微观硬度、表层微观组织结构等表面质量的差异。现有关于工艺参数对表面质量的影响研究表明:静压力、振幅对 CRS 影响显著,进给量对表面粗糙度的影响最大,提高滚压次数会增大表面 CRS 值,且多次滚压强化后材料的微动疲劳寿命要远高于单次强化结果[13-14]。对于不同的材料,工艺参数对表面质量的影响不尽相同。此外,材料本身的各向异性(如晶体取向)对强化后表层微观组织结构及残余应力亦有较大的影响[15]。

以往的研究[16-17]主要聚焦 USR 的表面强化和力学模型优化上,但缺乏对 USR 材料疲劳行为进行系统的综述。本研究首先总结了不同工艺参数 USR 处理金属的表面完整性,包括残余应力、表面形貌和微观组织,以及残余应力在疲劳加载过程中的释放;其次,综述了钢、钛合金、铝合金和镍基高温合金等材料在不同类型的疲劳加载过程中服役寿命的变化,并分析了不同工艺 USR 诱导的表面完整性对疲劳性能的影响及其潜在机理;然后,阐述了与 USR 相关的复合强化方法的最新进展;最后,展望了 USR 金属材料的应用前景,以期为后续高质量和高性能 USR 金属材料的开发设计提供借鉴和参考。

1　USR 诱导的残余应力

1.1　滚压参数对残余应力的影响

USR 通过静态滚压和诱导弹塑性应力波来产生残余应力,从而导致局部塑性变形。一般情况下,CRS 幅值和 SPD 深度与 USR 工艺参数密切相关,如静压力[18]、超声振动幅值[19]、进给量及滚压速率[20]和滚压次数[21-22]等。合理 USR 参数引起的 CRS 是提高材料疲劳寿命的主要原因之一。

1.1.1　静压力

静压力对 CRS 分布存在重要影响,引起不同材料表面产生有效 CRS 的静压力范围也存在差异。例如,LIU 等[23]将不同静压力的 USR 应用到 18CrNiMo7-6 钢,发现在 150 ~ 450 N 范围内,CRS 幅值(700 ~ 880 MPa)和影响层深度(1.4 ~ 2.0 mm)均与静压力大小呈正相关。而在 17Cr2Ni2MoVNb 合金[24]中,当施加 600 ~ 1 200 N 的静压力时,材料表面才生成了有效 CRS。类似的现象也在 7075 合金(100 ~ 300 N)[25]中报道了。

然而,以上结果仅在一定范围内成立。例如,WANG 等[7]研究了不同静压力对 Ti-6Al-4V 合金残余应力的影响,表明随着静压力从 900 N 提高到 1 200 N,CRS 幅值呈现出先增加后降低的趋势,并在 1 100 N 处达到最大值 820.1 MPa。XU 等[26]关于 51CrV4 弹簧钢的试验结果证明,在 398 ~ 862 N 区间内,663 N 的静压力诱导了最高的 CRS 幅值和最大的影响层深度。而 LI 等[27]将不同静压力下 Ti-6Al-4V 合金的 CRS 实测值与模拟值进行对比(图 2),指出应力最大值出现在 ~600 MPa 处。从上述文献可知,在一定范围内增大静压力会提高 CRS 幅值和影响层深度;而当施加的静压力高于引起 CRS 饱和的阈值时,其幅值将降低。这与 USR 过程中,位错的增殖和湮灭密切相关[27]。

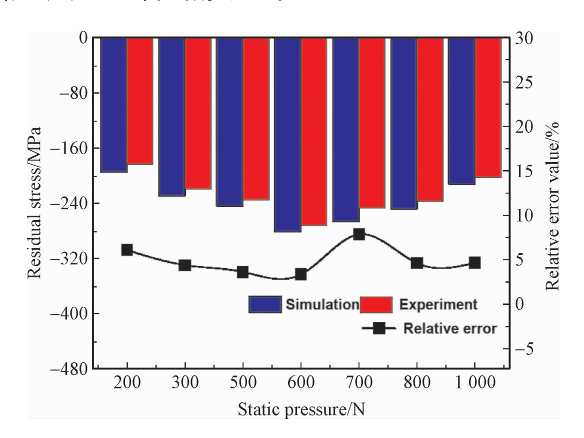


图 2　不同静压力下 Ti-6Al-4V 合金残余应力模拟与试验结果的对比及其相对误差分析[27]

Fig. 2　Comparisons and relative deviation analyses between simulated and experimental results of Ti-6Al-4V alloy under different static stresses[27]

1.1.2　超声振动幅值

一般而言,超声振动波的产生和传导会在静压力的作用基础上,导致材料表面内应力的重新分布,使得 CRS 幅值和硬化层深度进一步增加[6]。据报道,随着超声振动幅值从 4 μm 提高至 10 μm,马氏

体不锈钢滚压表面的 CRS 最大值由 580 MPa 上升至 780 MPa[23]。

图3总结了不同超声振动幅值下,12Cr2Ni4A 钢残余应力幅值、硬化层深度和维氏硬度的变化关系[9]。如图所示,三者均随着振动幅值的增加而持续增加;然而当振幅超过 3 μm 时,硬化层深度达到饱和值。另一方面,超声振动对变形层深度的影响也体现在 CRS 的峰值位置变化上。LIU 等[28]采用弹塑性变形理论对 18CrNiMo7-6 钢进行数值计算,结果表明在一定范围内,该深度值(150 ~ 210 μm)与超声振幅(4 ~ 10 μm)成正比。而 ZHENG 等[25]指出,随着振动幅值的增大,工件表面 CRS 的峰值位置逐渐向试样内部移动。由此可知,超声振动能够对静压力产生的 CRS 起增幅作用,且其改善程度随着振动幅值的增大而增大。

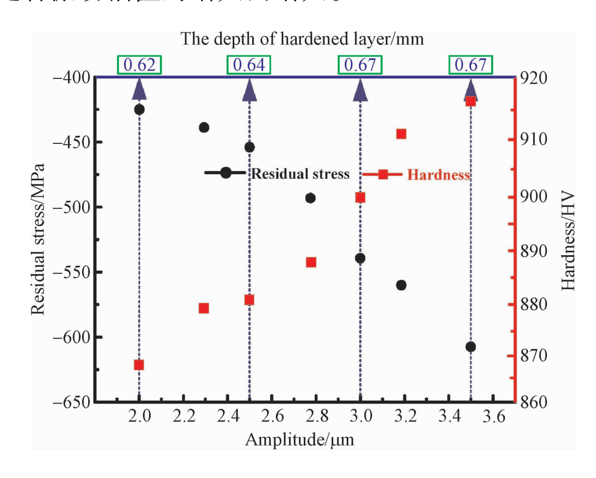


图3 不同超声振动幅值下,12Cr2Ni4A 钢表面残余应力、硬化层深度和维氏硬度的变化关系[9]

Fig. 3 Variation relationships of surface residual stress, hardened layer depth and hardness of 12Cr2Ni4A steel under different ultrasonic vibrant amplitude [9]

1.1.3 进给量和滚压速率

USR 过程中,进给量和滚压速率对试样表层残余应力的分布同样存在较大影响。与静压力和超声振动幅值相反,进给量和滚压速率的增加对 CRS 幅值起削弱作用。图4给出了进给量和滚压速度对 12Cr2Ni4A 钢表面残余应力幅值、硬化层深度和维氏硬度的影响关系[9]。由图4(a)可知,随着进给量的增加,CRS 和表面硬度有所降低。这是因为在 USR 过程中,轴向滚压速度由进给量决定;当进给量较大时,轴向滚压速度较大,试件轴向单位长度的滚压次数降低,试件表层塑性变形减少,导致 CRS 幅值减小。此外,滚压速率对上述指标也存在一致的影响趋势(图4b)。

相同的结论也在 TC4 钛合金中被证实了[29]。此外,其进一步论证了滚压速率对 CRS 演变的潜在原因:由于 USR 压头撞击频率是固定的,因此压头撞击样品表面的次数是恒定的。进给量和滚压速率决定了试样表面上滚压方向的连续性。当进给量和滚压速率较大时,试样表面的不连续程度增大,试样表面的局部位置得不到处理。因此,进给量和转速的增大会使粗糙度值增大。进而导致试样的表面塑性变形减弱,由此使得硬度和残余应力减小。然而,相对超声振动或进给量(图2 ~ 3),滚压速率导致 CRS 的变化程度不显著;这表明 CRS 对滚压速率相对不敏感。更有甚者,硬化层深度随进给量的变化而保持不变。

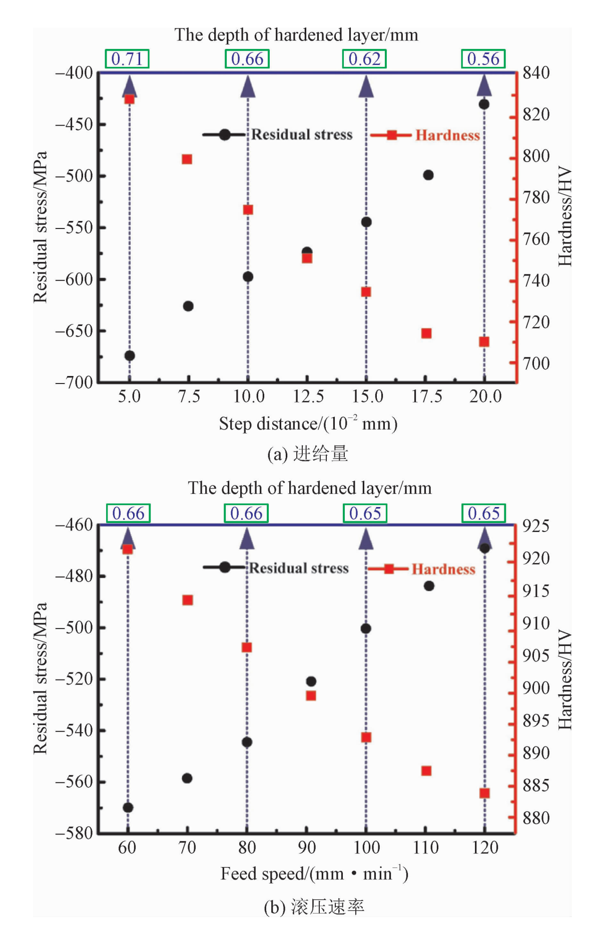
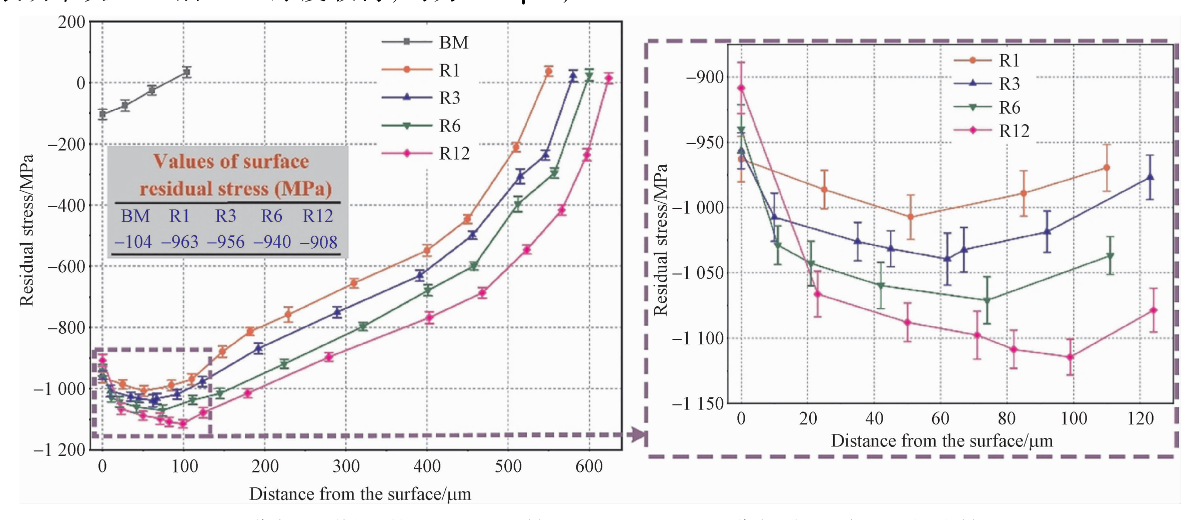


图4 不同进给量和滚压速率下,12Cr2Ni4A 钢表面残余应力、硬化层深度和维氏硬度的变化关系[9]

Fig. 4 Variation relationships of surface residual stress, hardened layer depth and hardness of 12Cr2Ni4A steel under different step distance and feed speed[9]

1.1.4　滚压次数

滚压次数直接决定了 USR 压头对材料的下压深度。整体而言,滚压次数越多,下压深度越大。LIU 等[30]采用不同次数的 USR 处理了 EA4T 车轴钢,表明单次 USR 后 CRS 厚度较薄,约为 500 μm;当滚压次数增加到 10 次时,CRS 厚度达到 1 500 μm。且在该范围内,表面 CRS 值和 CRS 最大值都随着次数的增加而增加。图 5 为不同滚压次数下,Ti-6Al-4V 合金表面残余应力分布[31]。



注:BM 代表 USR 前的基材(base material)样品;Ri (i=1, 3, 6, 12)代表进行了 i 次 USR 处理的样品。

图 5　不同滚压次数下,Ti-6Al-4V 合金表层残余应力分布[31]

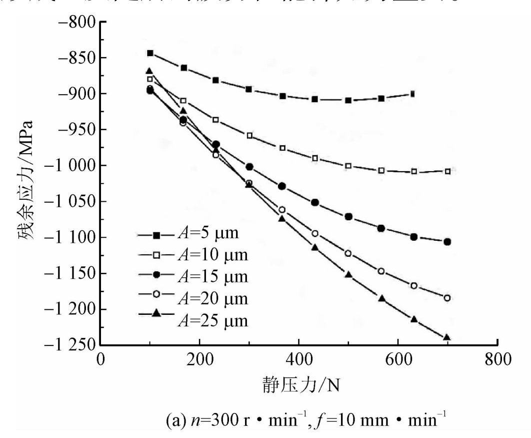
Fig. 5　Surface residual stress distributions of Ti-6Al-4V alloy under different rolling cycles[31]

由图 5 可知,CRS 最大值均出现在亚表面,相比于 LIU 等[30] CRS 的变化趋势,此研究中表面 CRS 值却在单次滚压处存在饱和现象。该现象是由 USR 压头向下压实过程中,材料表面向辊道两侧挤压过度的结果。与此同时,就 17-4PH 钢[32]而言,单次和 12 次 USR 处理后 CRS 最大值分别出现在材料表面和压表面。这说明了当滚压次数较少时,滚压深度较小,挤压量较少,对表面 CRS 的弱化可忽略;而滚压次数较多时,情况则相反,表面 CRS 损伤随着滚压次数的增加而增加。此外 LUO 等[33]报道,当塑性变形达到临界值时,甚至处于亚表面的 CRS 最大值也出现了降低现象。因此,合理的滚压次数对 CRS 的形成以及随后的疲劳性能都尤为重要。

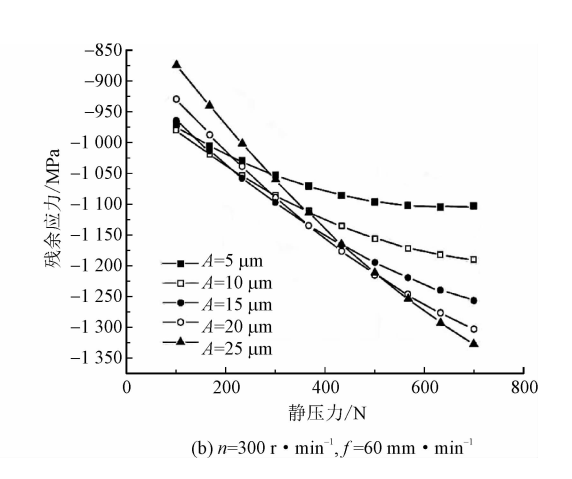
1.1.5　综合影响

图 6 为风电轴承套圈 42CrMo 钢棒状试件在不同位移参数(转动速度、进给速度)下,力值参数(静压力、振幅)对残余应力的影响[34]。

由图 6 可知,在试件转动速度和进给速度的给定范围内,表面 CRS 随着静压力的增大而持续增大,但增速逐渐降低。这说明表面 CRS 对静压力的敏感性存在饱和效应。另一方面,在较高的静压力作用下,超声振幅的改变引起的残余应力变化较大;相对而言,当静压力较低时,超声振幅的改变几乎不引起残余应力变化。这表明静压力和振幅对 CRS 幅值的增效性。



(a) n=300 r・min^{-1}, f=10 mm・min^{-1}



(b) n=300 r・min^{-1}, f=60 mm・min^{-1}

(c) n=300 r·min^{-1}, f=30 mm·min^{-1}

(d) n=100 r·min^{-1}, f=30 mm·min^{-1}

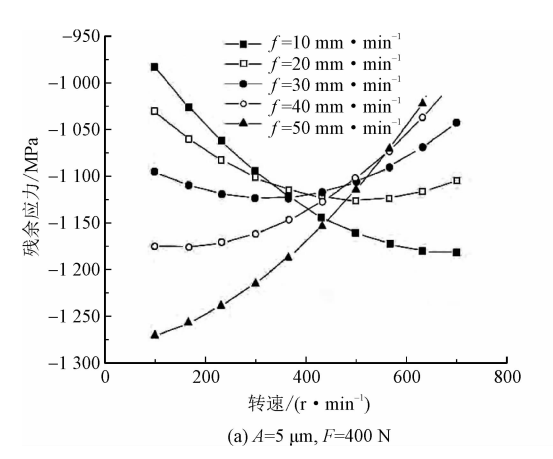
(e) n=600 r·min^{-1}, f=30 mm·min^{-1}

注：n 为转动速度；f 为进给速度。

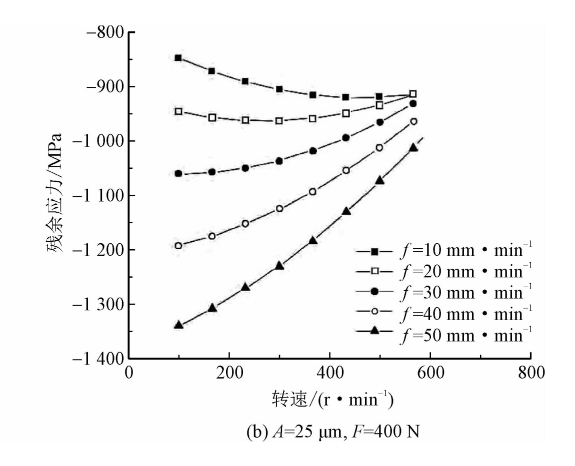
图 6　不同静压力、振幅下 42CrMo 钢的残余应力幅值[34]

Fig. 6　Residual stress amplitudes of 42CrMo steel under different static stresses and vibrant amplitudes[34]

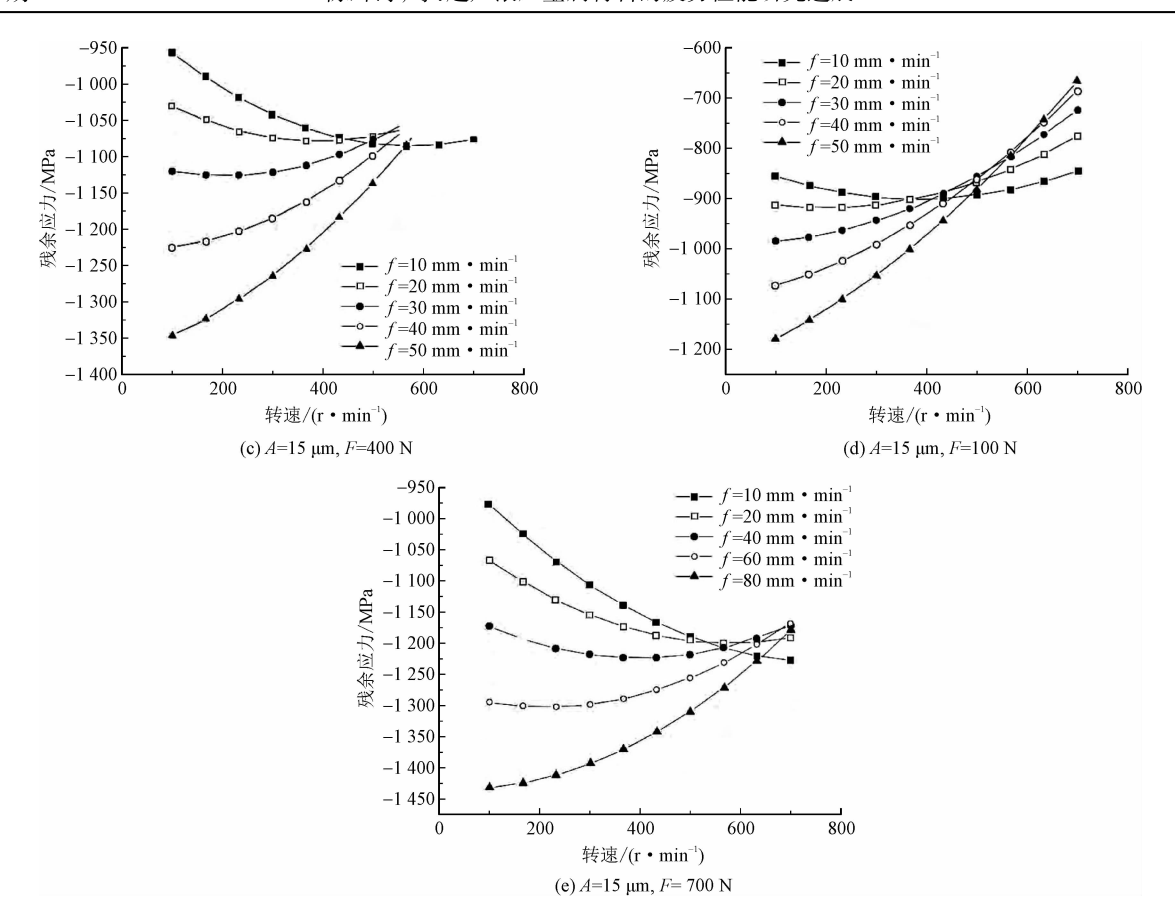
将图 6 数据进行置换，得到该材料在不同力值参数（静压力、振幅）下，位移参数（转动速度、进给速度）对残余应力的影响，如图 7 所示[34]。在转动速度过低时，进给速度改变引起的残余应力变化较大；当转动速度过高时，进给速度变化对残余应力的影响并不明显。这表明转动速度与进给速度对残余应力值的影响也具有一定的交互作用，两者的耦合作用调控了单位时间的冲击密度，同时也对单次冲击时各应力的分布产生了影响，最终影响体积变形的方向及均匀性，从而对残余应力的大小产生影响。



(a) A=5 μm, F=400 N



(b) A=25 μm, F=400 N



注:A 为振幅;F 为静压力。

图 7　不同转速、进给速度下 42CrMo 钢的残余应力幅值[34]

Fig. 7　Residual stress amplitudes of 42CrMo steel under different rotational speeds and feed speeds[34]

1.2　疲劳过程中残余应力的释放

1.2.1 残余应力的释放规律

众所周知,CRS 通过抵消疲劳试验中的有效外加应力来减轻材料遭受的损伤程度,从而抑制裂纹的萌生和扩展。作为代价,USR 诱导的 CRS 在循环变形过程中会逐渐耗散或释放。此外,有研究表明在前期的若干次疲劳循环中,CSR 会发生较大的释放,在随后的疲劳过程中 CSR 会逐渐趋于稳定[13]。而对提高材料疲劳强度有增益效果的 CSR 是经过一定释放后残留下来的 CSR 稳定值[13]。影响残余应力释放过程的因素主要有材料及其微观结构、材料强度、强化状态、加载条件等。

图 8(a)为应力水平 800 MPa 下,USR 处理 17-4PH 钢疲劳前后的表面残余应力[35]。从图中可知,疲劳试验后,表面 CRS 明显降低;超过 366 MPa 因局部塑性而松弛。图 8(b)为疲劳试验前的疲劳寿命与表面 CRS 曲线,两者呈正相关关系。这意味着当 CRS 越大时,疲劳抗力越高。且在不同疲劳加载模式下,其寿命提升程度也有所差异。例如相对一次滚压(图中 USRP-1)而言,三次滚压(图中 USRP-3)的常规疲劳(plain fatigue,PF)寿命明显比微动疲劳(fretting fatigue,FF)寿命高。一方面,由于最大有效应力的变化,USRP-3 试样的疲劳裂纹起裂部位离试样表面的垂直距离变大,使疲劳寿命增加;另一方面,说明 USRP-3 样品的微观结构发生了明显的变化,导致了这一结果。

图 8(c)~(d)分别为 USR 处理 GH4169 旋转弯曲疲劳试验前后的残余应力分布[36],和应力水平为 850 MPa 下,USR 处理 Ti-6Al-4V 表面残余应力演化[37]。可以看出,一次滚压(图中 USRP-1)和 24 次滚压(图中 USRP-24)材料表面 CRS 沿深度大小在疲劳后整体降低了(图 8c)。这直接说明 USR 诱导的 CRS 对材料疲劳寿命的提升是以其幅值耗散为代价的。而且这种耗散不是一蹴而就的,而是在每次循环的累积中逐渐叠加的结果(图 8d)。

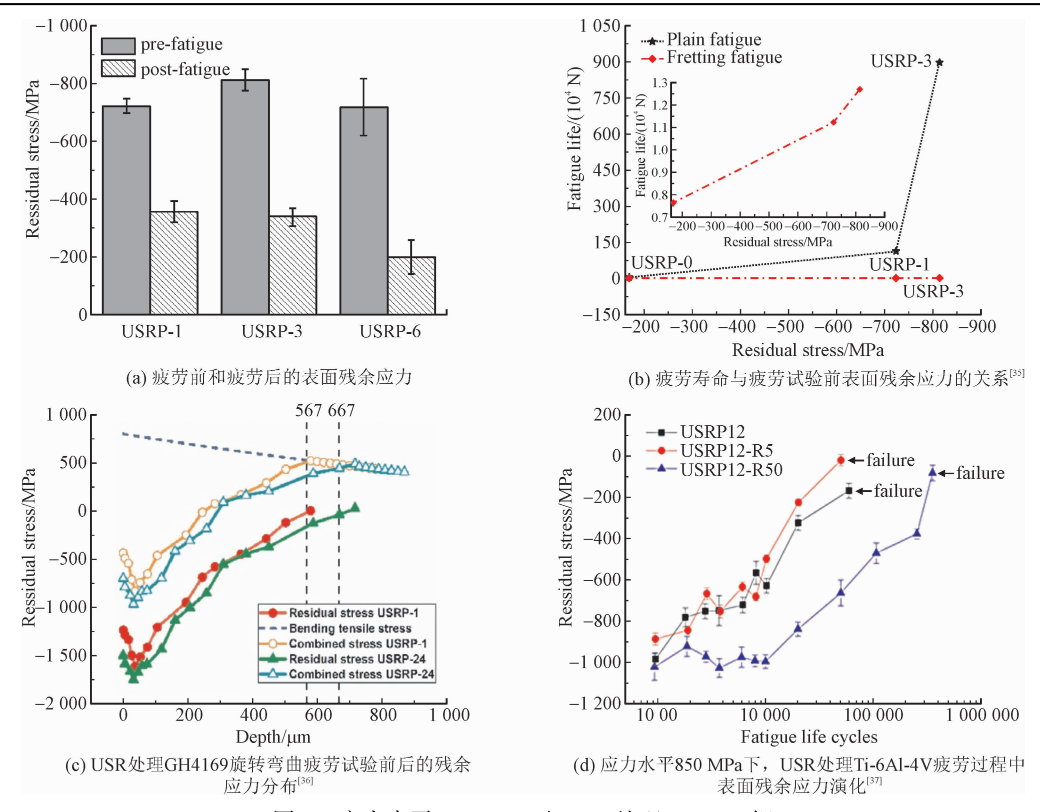


图 8 应力水平 800 MPa 下,USR 处理 17-4PH 钢

Fig. 8 USR-treated 17-4PH steel under stress level of 800 MPa

1.2.2 残余应力的释放机制及释放模型

超声滚压后,合金表面晶粒因发生大塑性变形而得到细化。但是,高温或载荷的作用会使细晶组织趋于不稳定,晶粒尺寸会在这些过程中发生粗化,细晶组织的一些增效特性也会因此弱化。WU 等[38]将超细晶的 Cu 合金在常温下进行疲劳加载,发现其中少数晶粒发生再结晶现象,并认为是塑性变形导致晶粒粗化。同时,WITNEY 等[39]对纳米化的单晶 Cu 进行疲劳加载,证明纳米晶粒的尺寸在几十万个拉-拉疲劳周次后长大了约 30%。晶粒的长大可能是由晶粒的旋转引起亚晶的团聚和晶界迁移导致的亚晶粗化相互作用的结果[40]。此外,分子动力学模拟和试验还认为,形变孪晶的形核也是细晶组织长大的原因之一[41]。

残余应力释放行为的模型研究工作主要分为两类:温度引起的残余应力释放和载荷引起的残余应力释放[42]。与残余应力热稳定性问题不同,残余应力的载荷稳定性问题更加复杂,因为影响该过程的因素更多。对工程应用来说,研究循环载荷引起的残余应力释放有更重要的实际意义。表 1 列举了部分残余应力的循环应力释放模型,包括模型原理、主要公式以及适用条件等。

表 1 残余应力的循环应力释放模型

Tab. 1 Release models of residual stress under cycle stresses

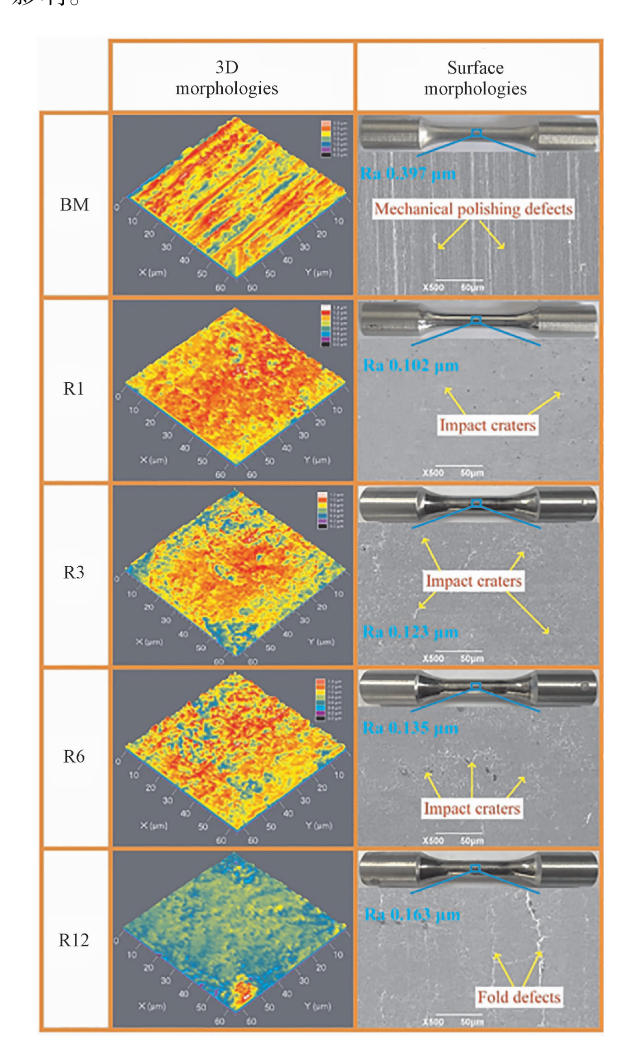
模型原理	主要公式	适用条件及优缺点	参考文献
平均应力松弛原理	$\frac{\sigma_{mN}}{\sigma_{m1}} = \frac{\sigma_y - \sigma_a}{\sigma_{m1}} - \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_y}\right)^b \log N$	应变控制的拉压疲劳。该模型的缺点是只适用于应力比 $R = -1$ 的循环载荷,因为材料表面残余应力只有在 $R = -1$ 时,才能用平均应力的概念来类比。	[42]
平均应力松弛原理	$\sigma_{mN} = \sigma_{m1}(N)^B$	只适用于应力比 $R = -1$ 的循环载荷。形式简单。	[43]
线性对数松弛原理	$\sigma_N^{re} = A + m\log N$	只适用于第一个载荷循环后的残余应力释放。	[44]
线性指数松弛原理	$(\sigma_{res})_{relax}/(\sigma_{res})_{1cycle} = N^k$	只适用于第一个载荷循环后的残余应力释放。	[45]
线性指数松弛原理	$\frac{\sigma_N^{re}}{\lvert\sigma_0^{re}\rvert} = A\left[\frac{\sigma_{max}\sigma_a}{(C_w\sigma_y)^2}\right]^m (N-1)^B - 1$	不仅考虑了初始加工硬化程度,也考虑了拉压载荷过程中的包兴格效应。	[46]
线性指数松弛原理	$\frac{\sigma_N^{re}}{\lvert\sigma_0^{re}\rvert} = A\left[\frac{2\sigma_a^2}{(1-R)(C_w\sigma_y)^2}\right]^m (N-1)^B - 1$	不仅考虑了初始加工硬化程度,也考虑了拉压载荷过程中的包兴格效应,还考虑了应力比 R 的影响。	[47]

2　USR 表面形貌和表层组织

2.1　表面形貌

一般而言,材料经滚压头高频冲击后,表面产生一定的塑性金属流动,使微观形貌上的波峰被挤压变形填充波谷,从而有效降低材料的表面粗糙度[48]。图 9 为不同滚压次数 Ti-6Al-4V 的三维表面形貌和扫描电镜照片[31]。图 9 显示,原始试样表面有明显的机械抛光缺陷。经过一次 USR 后,R1 试样表面相对光滑致密,具有镜面特征。试样表面仅出现少量微撞击坑,表面粗糙度小于 BM 试样。随着加工次数的增加,这些凹坑的密度逐渐增大,导致 R3 和 R6 试样的表面粗糙度略高于 R1 试样。当加工次数进一步增加,由于超声波的剧烈冲击和挤压,一些表面材料被挤压到辊道两侧,导致褶皱缺陷和微裂纹的出现。因此,R12 样品的表面粗糙度 *Ra* 最高。值得注意的是,所有滚压试样的 *Ra* 值在 0.102 ~ 0.163 μm 之间,明显低于原始试样的 *Ra* 值(0.397 μm)。这是冲击和挤压的耦合作用在处理表面引起塑性流动,并使机械抛光缺陷光滑的结果。

在 USR 过程中,硬质压头始终压在试样表面以一定的进给速度向前滚动,试样表面在静载轧制和高频超声振动的协同作用下发生塑性变形。从宏观上看,USR 压头的挤压使试样表面的凸起或凹坑变得平滑,从而达到平滑的效果。微观上,塑性变形使位错移动和相交、晶粒细化,使粗糙度显著降低。图 10 为不同转速滚压处理 Ti-6Al-4V 的表面三维形貌和扫描电镜照片[49]。在不同转速下,试样的表面完整性略有差异。一般而言,在相同的振动频率下,主轴转速越慢,硬化点越密集,在同一位置发生多次硬化,或产生硬化点重合,有利于表面完整性的提高。然而图 10(c)显示,在较低的转速下,一些深加工轨迹没有完全填充,这可能与转速过慢造成压头在试样表面过度加工有关。此时,样品的表面粗糙度仍然较高,*Ra* 约为 0.165 μm。当转速增加到 200 r/min 时,试样内部的微结构单元在试样表面连续的复合载荷作用下不断发生塑性变形,试样表面的切屑加工痕迹几乎完全去除。表面完整性相对较好,粗糙度最小,如图 10(e)所示。当转速继续增加到 400 r/min,则样品表面会出现新的轧制加工痕迹,甚至可能因加工速度过快而出现裂纹和剥落,粗糙度也略有增加,如图 10(g)所示。分析表明,在高转速下,USR 压头与试样的接触将由单一的滚动摩擦转变为滚动与滑动并存运行模式。滑动摩擦会增加摩擦系数,容易划伤样品表面,对表面质量产生负面影响。



注:BM 代表基材;R*i*(*i* = 1, 3, 6, 12)代表进行了 *i* 次 USR 处理的样品。

图 9　不同滚压次数 Ti-6Al-4V 的表面三维形貌和扫描电镜照片[31]

Fig. 9　3D morphologies accompanied with corresponding scanning electron microscope images of Ti-6Al-4V subjected to distinct USR cycles[31]

通常来说,USR 是一种有效降低表面粗糙度的技术。然而,当 USR 处理过度时,材料表面粗糙度甚至会比基材更差,如图 11 所示[50]。由于严重的超声波冲击和挤压,在处理表面上发现了表面缺陷,包括表面剥层和褶皱缺陷(图 11d)。在 USR 过程

中,一部分表面材料沿着滚压方向被挤压到辊道了两侧,相邻的表面之间相互重叠并紧密结合,形成褶皱缺陷。因此,由于表面缺陷的出现,滚压试样的 *Ra* 值平均值比原始试样高 72.6%。尽管如此,但相对于其他表面改性技术(如激光冲击)而言,USR 在降低表面粗糙度方面仍存在较大的优越性。图 12 为不同种类表面工艺处理增材制造 AlSi10Mg 合金的三维形貌及表面粗糙度[51]。图中显示,激光冲击、USR 以及激光冲击复合 USR 分别使得材料 *Ra* 值降低了 6.5%、63.5% 和 73.0%。因此,本例表明:USR 对材料表面粗糙度的改善程度约为激光冲击改善程度的 10 倍;且作者将此归因于不同工艺对孔隙率的降低程度不同。

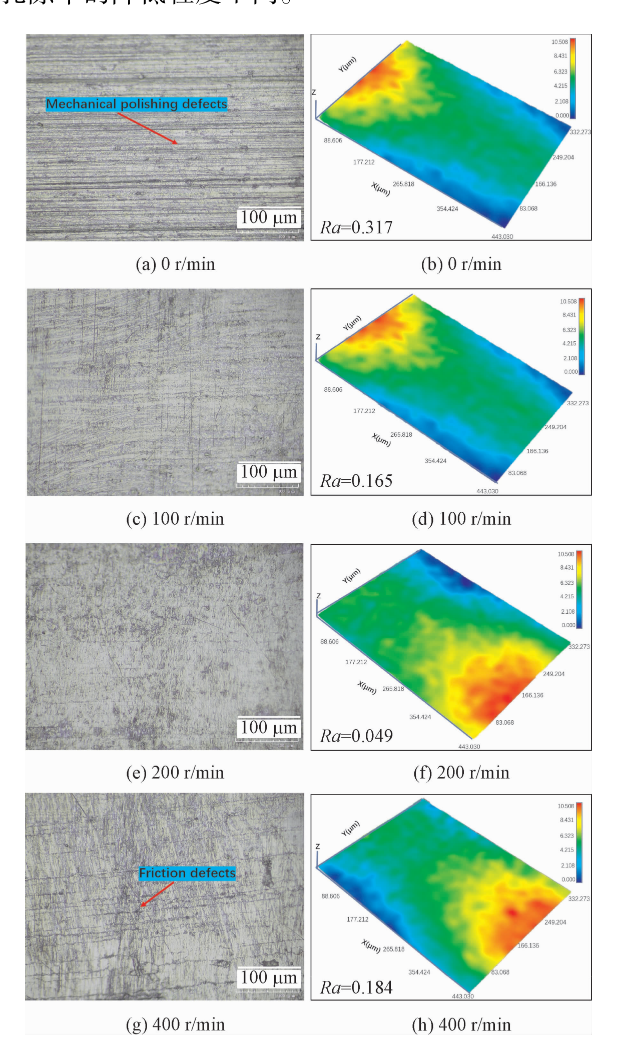


图 10 不同转速下 Ti-6Al-4V 的表面三维形貌和扫描电镜照片[49]

Fig. 10 3D morphologies and scanning electron microscope images of Ti-6Al-4V subjected to rotational speed[49]

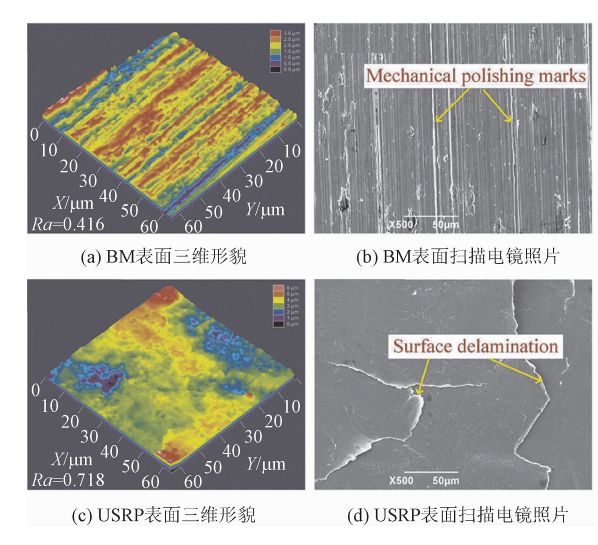
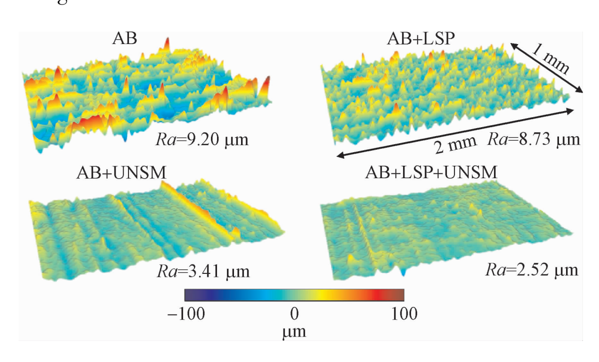


图 11 原始(BM)和滚压处理(USRP)后 Ti-6Al-4V 的表面三维形貌和表面扫描电镜照片[50]

Fig. 11 3D morphologies and scanning electron microscope images of Ti-6Al-4V with and without USR treatments[50]



注:AB 代表原始材料;LSP-激光冲击;UNSM 代表超声表面纳米化(类似超声滚压)。

图 12 不同种类工艺处理增材制造 AlSi10Mg 合金表面的三维形貌及表面粗糙度[51]

Fig. 12 3D morphologies and surface roughness of additive manufactured AlSi10Mg alloy encountered by different surface treatments[51]

2.2 表层组织

USR 使得材料作用位置表层发生相应的剧烈塑性变形。随着连续的联动载荷作用于不同位置的材料表面,其表面内部的组织不断发生演变,进而使晶粒细化,其细化程度甚至可达到纳米量级[52-53]。

作为诱导塑性变形的表面改性技术之一,USR 作用于位错密度较低的面心立方(face center cubic, FCC)结构材料时,可通过在组织中引入缺陷来达到材料强化对的目的。图 13 为不同静压力和幅值处理 602CA 镍基合金的截面 EBSD 图像[54]。图中显示滚压表层组织由最外层的亚微米晶粒层、中间细

晶层和内部的过渡影响层组成。KAM 图显示材料滚压后，塑性应变从外到内梯度分布。单独将振动幅值增加到 20 μm 时，过渡影响层、细晶层和亚微米晶粒层也分别增加到 320、120、50 μm。而单独将静压力增加到 50 N 时，样品的总影响深度为 400 μm，该厚度明显大于单独增加振动幅值的情形。因此，静压力增加到 50 N 比振动幅值增加到20 μm对该材料滚压效果的影响更大。此外，WANG 等[55]在滚压 AISI 304 奥氏体不锈钢时，对材料通上了交流电，研究了交流电频率对材料组织的影响。其结果表明，除了细晶强化和位错强化外，形变诱导马氏体相变，FCC 到体心立方(body center cubic，BCC)结构，同样为材料表面的硬化和强化做出了较大的贡献，也是不容忽视的表面强化机制之一。

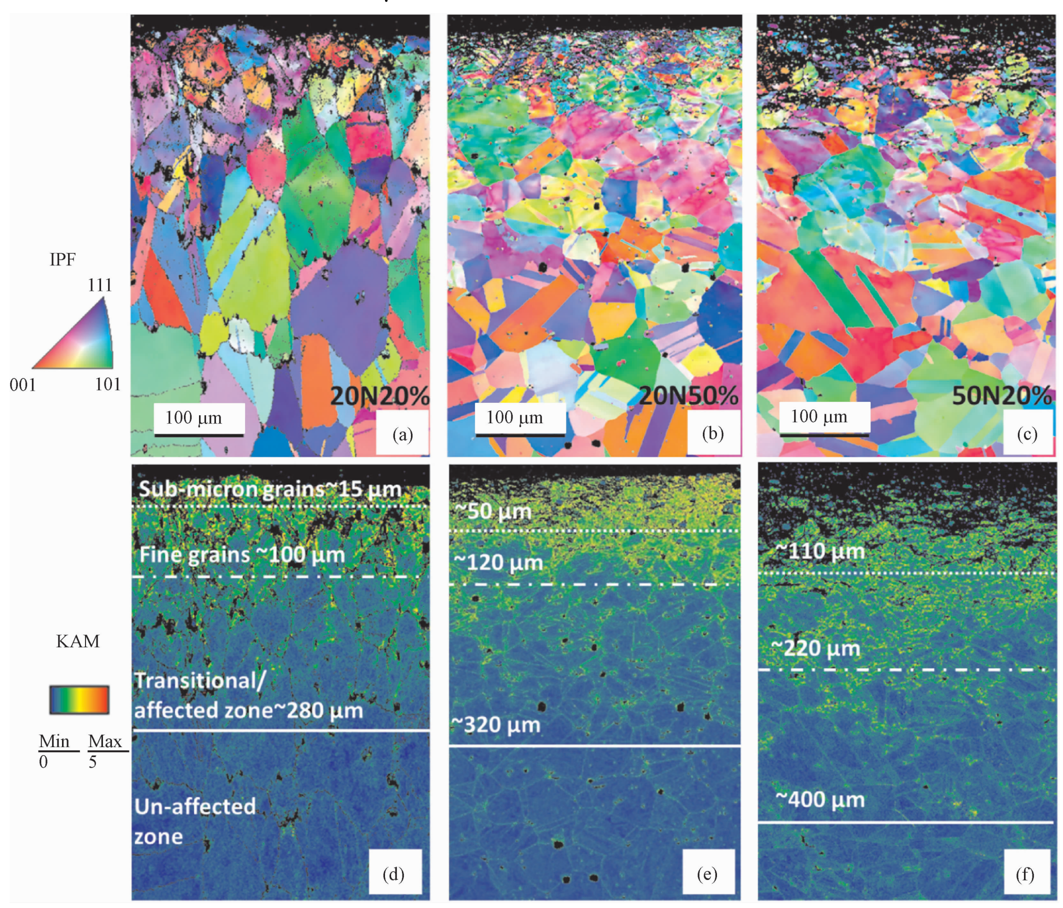


图 13　不同静压力和幅值处理 602CA 镍基合金的截面 EBSD 图像[54]

Fig. 13　Cross-sectional EBSD images of 602CA Ni-based alloy encountered by different static stresses and vibrant amplitudes[54]

而当滚压受体材料为内部晶界系统复杂、位错密度本身就较高的 BCC 结构时，细晶强化便不是材料强化的主导因素了。此时，内部组织形貌将自发演变甚至长大来容纳塑性应变，从使得应变能最小化，进而将整体稳定化。图 14 为 5 组不同静压力下 C53 钢试样的表面金相组织，均主要为回火马氏体结构[56]。从图 14(a)~(e)可看到试样表面组织呈现了明显的从先细化到再长大的过程，其中未加工试样微观组织较粗长，呈“粗条状”；在 400 N 和600 N 下，试样组织较细密；当静压力超过 600 N 时，可观察到针状马氏体开始变长；在静压力 1 000 N 下，试样晶粒与未加工试样的粒径相近，但形状相对细长。

另一方面，相对于传统的塑性变形技术(如喷丸)，USR 在位错增殖、细化第二相粒子和孪晶形核方面存在较大的优势。图 15 为 17Cr2Ni2MoVNb 钢的在不同表面处理后的 TEM 显微结构[57]；材料原始组织为碳化物、贝氏体铁素体和残余奥氏体等典型多相组织。对比图 15(b)和 15(c)可知，超声冲击波可将碳化物细进行有效细化；该细小颗粒可通过钉扎位错等方式，提升材料的疲劳强度。此外 WANG 等[58]证实，超声冲击波对碳化物的细化过程是通过塑性变形和高应变速率逐步累积的，可以有效避免过大的瞬时荷载在碳化物分裂时二次裂纹的萌生和形核。并且，在合适的超声载荷和频率作用下，可以激活更多的位错细胞和位错缠结，使得表面力学性能增强。

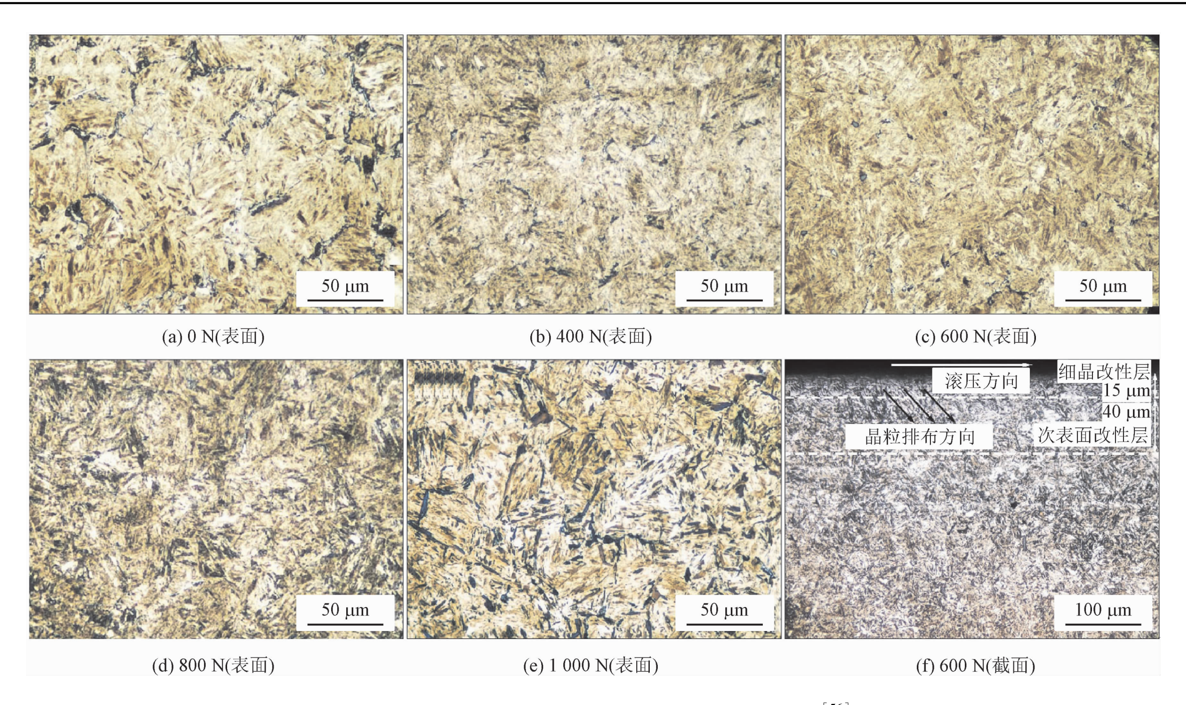
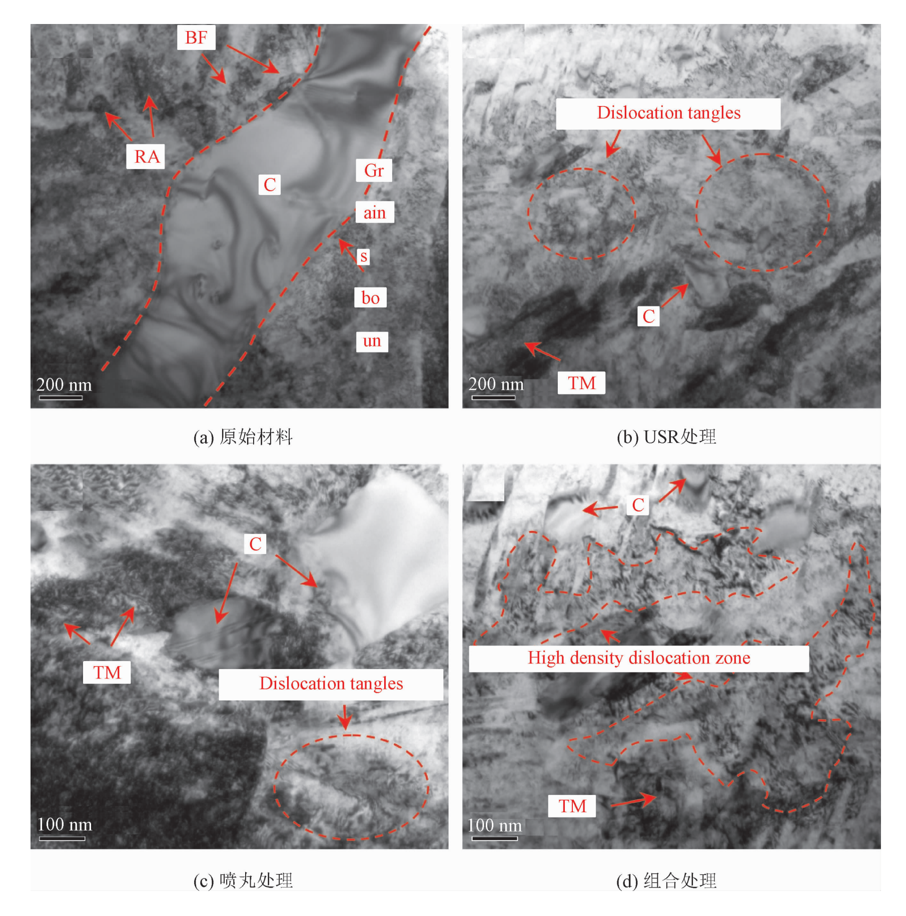


图 14 不同滚压静压力下 C53 钢试样金相组织[56]

Fig. 14 Optical surface microstructures of C53 steel suffered from static stresses[56]



注:C-碳化物;BF-贝氏体铁素体;RA-残余奥氏体;TM-孪晶马氏体。

图 15 17Cr2Ni2MoVNb 钢的 TEM 显微结构[57]

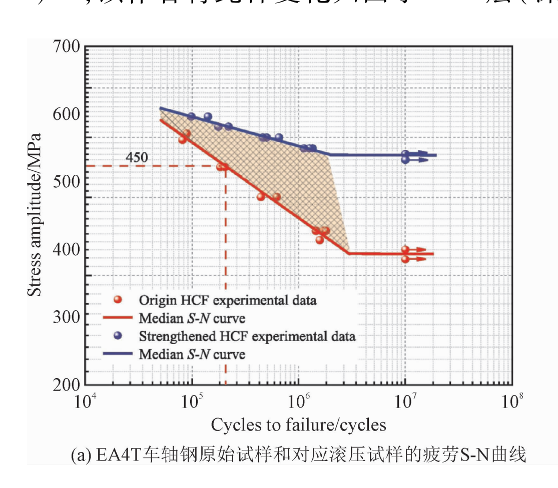
Fig. 15 TEM images of 17Cr2Ni2MoVNb withstood different surface treatments[57]

3　USR 金属疲劳及强化机制

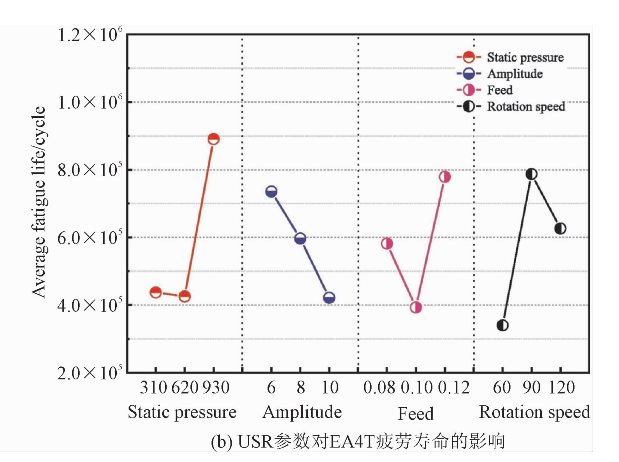
通常来说,USR 强化材料的疲劳性能提升程度主要由上述讨论过的 3 个因素(CRS 分布、表面粗糙度和表层组织)共同决定。此三者间是相互影响、对立统一的[59]。表层组织的演变必然伴随有表面粗糙度和 CRS 的变化[60]。然而,对于不同的疲劳模式和加载形式,三者的主导地位有所差异。例如高温环境中,在循环变形前期,CRS 对疲劳裂纹的萌生和扩展有较大的抑制作用;但当循环变形进入后期,由于 CRS 的热释放效应,其将失去主导作用[61]。

3.1　单轴拉压疲劳

单轴拉压疲劳是最常见的疲劳破坏形式之一。因此,采用 USR 对材料进行强化对于工程结构的寿命延长具有重要意义。到目前为止,就不锈钢[62]、铝合金[63]、镁合金[64]、钛合金[65]、镍基单晶[66]和多晶合金[67]等金属材料而言,USR 被认为是延长其疲劳寿命的有效手段之一。在 USR 处理下,EA4T 车轴钢的疲劳极限从 ~330 MPa 提升到了 ~480 MPa(图 16a)[5];该作者将此种变化归因于 SPD 层(深度 150 μm)内的梯度分布的晶粒尺寸以及显著增大的显微硬度和平均局部取向差;此外,通过有限元计算的方式,他们模拟了 SPD 层中沿深度方向的变形程度,证明了幅值位于亚表层(深度 45 μm)的等效塑性应变梯度也是提高疲劳行为的原因之一。当然,滚压参数也并不是越大越好;图 16(b)显示了不同 USR 参数对 EA4T 疲劳寿命的影响[5]。可以明显发现,平均疲劳寿命分别在静压力 620 N 和进给量 0.1 mm处达到最小值,在旋转滚压速度在 90 s^{-1}处达到最大值;并随着振动幅值的增加而减小。这是因为较小的 USR 参数不能使表面产生足够的塑性应变,不能得到饱和的 CSR 值;而过大的 USR 参数会使表面裂纹形核(如图 11d 中表面起鳞),增大应力集中因子[36]。相反,如若滚压参数超过一定范围时,USR 甚至会降低材料的高周疲劳性能。彭翔[67]引入反常疲劳极限尺寸效应理论,有效论证了镍基高温合金 Inconel718 疲劳性能恶化的主要原因为过度的 USR 造成晶粒尺寸的不均匀分布和高密度的高角度晶界;大晶粒内部形变孪晶与基体间较高的弹性不相容应力导致孪晶界面附近应变局部化,形成驻留滑移带,进而促进微裂纹萌生。



(a) EA4T车轴钢原始试样和对应滚压试样的疲劳S-N曲线



(b) USR参数对EA4T疲劳寿命的影响

图 16　USR 处理[5]

Fig. 16　Impact of USR processing[5]

综上所述,探寻最佳的处理参数就成为了众多研究者的重要课题之一。

3.2　弯曲扭转疲劳

航空发动机涡轮叶片和压气机叶片由于飞机在起飞、飞行和降落过程中产生的高频振动,可能会提前发生弯扭和振动疲劳故障。因此,可采用 USR 来改善航空关键部件材料的弯扭振动疲劳性能。LIU 等[50]初步研究了 USR 处理 Ti-6Al-4V 的弯曲疲劳性能,发现在特定试验条件下,试样的疲劳强度由 495 MPa 提高至 602 MPa,并将其归因于表层纳米结构和高幅 CRS 对疲劳前期裂纹萌生的抑制效应。

随后在其另一项工作中,通过疲劳试验优化了滚压次数对航空叶片弯曲性能的强化效果。将叶片的疲劳极限进一步提高到近 700 MPa, 如图 17(a) 所示[31]。而表面微损伤造成的粗糙度增加和表面 CRS 幅值降低被认为是重复滚压疲劳强化效果相对降低的主要原因。同时,具有密排六方结构的 α 晶粒具有相对较少的滑移系统;因此,其中一些 α 晶粒在经历 SPD 时会以产生形变孪晶的形式容纳过多的塑性应变。此时,位错与孪晶界的相互作用有助于分割原始晶粒,从而达到晶粒细化的目的,抑制疲劳裂纹萌生和扩展。类似的机制也在预腐蚀 7A52 铝合金[68]、热处理 TC4 样品[29]和 AISI 304 不锈钢[69]中观察到了。

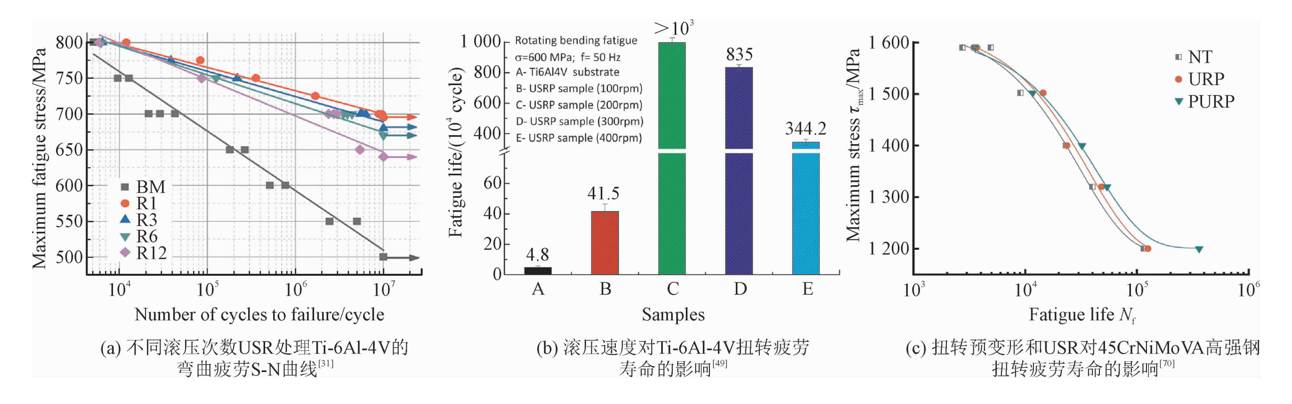


图 17 各参数对试样疲劳强度的影响

Fig. 17 Influence of each parameter on fatigue strength of sample

PANG 等[49]分析了不同滚压速度对扭转疲劳的影响,结果如图 17(b)所示。可以发现,在大多数情况下,USR 叶片的疲劳寿命比原始叶片提高了 1 个数量级以上。然而,其提升程度并不是与滚压速度成正比,而是在 200 r/min 处达到峰值。当滚压速度进一步增大时,强化层厚度增加;当位错密度达到极限值时,晶粒结构在亚晶界处发生缠结和融合,最终使晶粒尺寸增大;因而使得循环过程中疲劳裂纹源的过渡内迁,致使扩展速度加快,从而使得相对寿命降低。

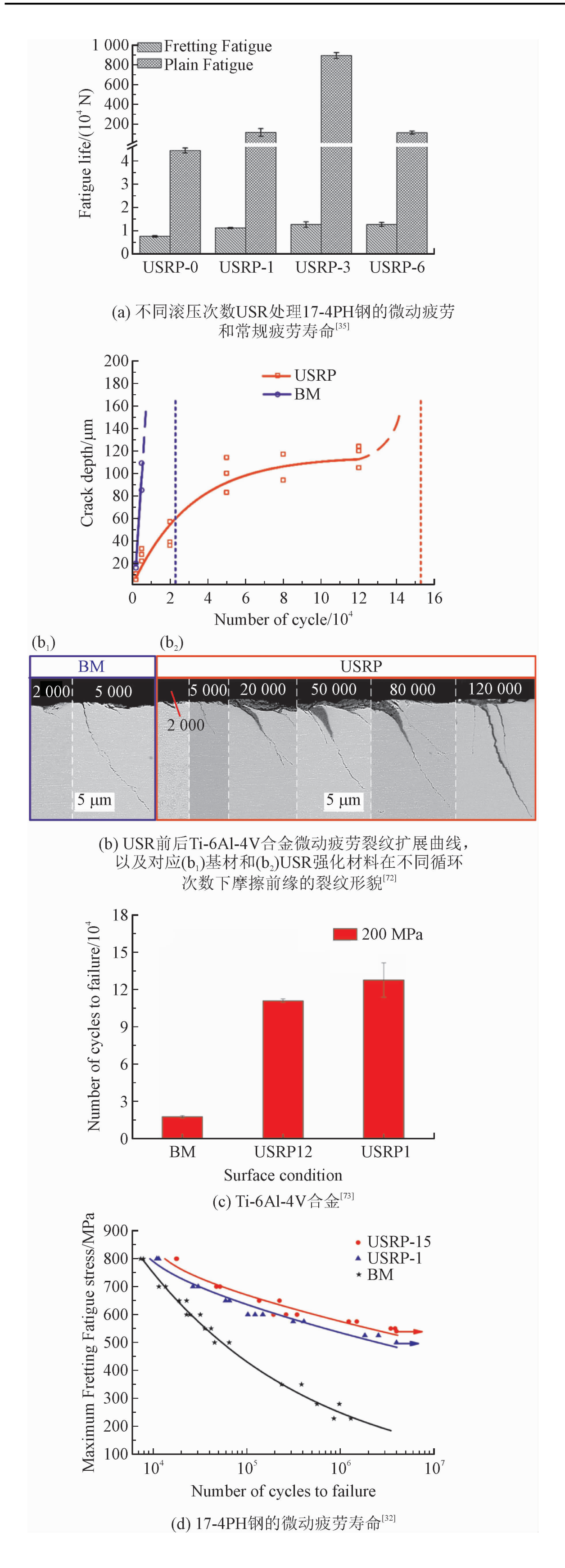
另有报道称,在滚压之前对 45CrNiMoVA 高强钢进行扭转预变形可增加 USR 对材料疲劳寿命的提升程度(图 17c)[70]。这是因为扭转预变形过程使试样表面的马氏体组织向扭转方向偏转,大大增加了位错密度,提高了材料的剪切屈服强度。而随后的 USR 过程会使试样表面微观组织沿滚压方向产生塑性流动,表面塑性变形更为明显,可以放大 USR 工艺对表面的塑性效应。

3.3 微动疲劳

微动疲劳是两个接触体同时承受循环载荷和微幅切向相对运动而产生损伤的现象。微动作用不仅会加速承载构件表面质量的恶化,而且还会促进疲劳裂纹的萌生和扩展,导致材料的疲劳抗力比常规疲劳作用时降低 50% ~70%[71]。为了提高抗微动疲劳性能,可采用 USR 诱导接触表面下的 CRS 来提高材料的疲劳强度,并改善试样的接触面质量,抑制裂纹的萌生,以期达到微动条件下的延寿目的。

图 18(a)为不同滚压次数 USR 处理 17-4PH 钢微动疲劳和常规疲劳寿命的比较[35]。从图中易知,该材料的微动疲劳寿命远小于常规疲劳寿命,这是因为垫块前缘在试样表面造成了较大的应力集中,降低了裂纹开动所需的能量阈值。此外除了 CRS 和硬化层外,USR 在 3 次滚压样品表面诱导了明显的鱼鳞状形貌,可以通过吸收微动接触区的摩擦能,减轻疲劳过程中的表面微动损伤。

FAN 等[72]研究了 Ti-6Al-4V 合金 USR 前后的微动疲劳裂纹扩展行为,如图 18(b)所示。该研究表明微动裂纹主要起始磨损区和无磨损区的交点处,然后倾向磨损区进行扩展。因此,USR 引起的 CSR 场主要对疲劳早期扩展行为存在抑制作用,而对裂纹萌生行为影响不大。根据最大滑移幅值准则和最大耗散能准则,他们通过有限元方法成功地预测了微动裂纹萌生位置和扩展方向。



(a) 不同滚压次数USR处理17-4PH钢的微动疲劳和常规疲劳寿命[35]

(b) USR前后Ti-6Al-4V合金微动疲劳裂纹扩展曲线,以及对应(b_1)基材和(b_2)USR强化材料在不同循环次数下摩擦前缘的裂纹形貌[72]

(c) Ti-6Al-4V合金[73]

(d) 17-4PH钢的微动疲劳寿命[32]

图 18　微动疲劳试验

Fig. 18　Fretting fatigue tests

在不同滚压次数的作用下,AO 等[73]强调无序状的梯度纳米 β/α-Ti 结构在延迟了微动疲劳裂纹的萌生和早期扩展方面存在较大优越性(图 18c)。而在重复滚压后,由于无序状结构的破坏以及由此导致的 CRS 释放,微动疲劳寿命降低。然而,17-4PH钢[32]的试验结果却表现出相反的趋势,即疲劳寿命随滚压次数的增加而增加(图 18d)。这是因为二者残余应力相近,但重复滚压导致试样表面鱼鳞状形貌明显,起到了“间隔效应”,减少了样品表面与垫块之间的实际接触面积,减轻了表面损伤。CRS 能显著降低裂纹张开位移和临界应力值,是影响材料微动疲劳行为的主要因素。然而,表面形貌,硬化层组织对疲劳性能的提升也存在较大影响。

3.4　腐蚀疲劳

腐蚀疲劳裂纹是工程应用中影响金属构件的常见问题。此时,裂纹萌生是由循环应变和腐蚀环境的耦合作用引发的,而裂纹扩展主要以沿晶和穿晶两种方式发生[74]。在腐蚀疲劳过程中,腐蚀作用造成材料损失和应力集中,为疲劳裂纹的形核创造了良好的条件,因此疲劳裂纹总是在腐蚀坑处开动,导致疲劳寿命的缩短。一些研究表明,USR 诱导的表面 CRS 场和晶粒细化可以通过降低腐蚀介质对试样表面的腐蚀速率,提高材料腐蚀疲劳性能[75-78]。据报道,USR 可使 TC11 合金的热腐蚀疲劳极限提高 10.26%[75]。

在相同试验条件下,USR 对 300M 超强钢腐蚀疲劳寿命的提升程度为对其微动疲劳提升程度的 6 倍[76]。这是因为 USRP 可以通过产生具有均匀电化学活性的样品表面来减少表面缺陷,降低腐蚀坑的形成速率;一旦循环荷载使得疲劳微裂纹在腐蚀坑处形核,则在亚表面位置的高幅值 CRS 可以起到修复微裂纹、阻碍其进一步深入的作用。由于微动疲劳和腐蚀疲劳的失效机制不同;微动疲劳比腐蚀疲劳更容易损伤 USR 处理样品的表面,释放表面残余应力。因此,与微动疲劳寿命相比,USR 处理对腐蚀疲劳寿命的改善更为明显。此外,对 USR 处理前后 7B50-T7751 铝合金的腐蚀疲劳试验表明,CRS 和晶粒梯度结构可同时通过提高 NaCl 向材料内部的扩散阻力和材料疲劳强度系数及指数,达到减缓腐

蚀坑的形成和抑制腐蚀疲劳裂纹萌生以及早期扩展的目的,使得腐蚀疲劳强度提高 117%[77]。LI 等[78]对比了 USR 处理前后 EA4T 车轴钢的常规疲劳和雨水环境下的腐蚀疲劳裂纹扩展行为,发现相对于常规疲劳,USR 对材料腐蚀疲劳的提升程度大得多(图 19a);腐蚀裂纹的扩展速率对应力水平较为敏感(图 19b ~ c)。当常规疲劳加载时,USR 超细晶粒保持不变,位错结构略有湮灭(图 19d)。轴向 CRS 也出现了轻度下降。当腐蚀疲劳加载时,试件表面形成的密集腐蚀裂纹。裂纹的扩展导致位错组织的强烈湮灭和轴向 CRS 的快速松弛。由于腐蚀侵蚀,表面甚至存在局部的残余拉应力。

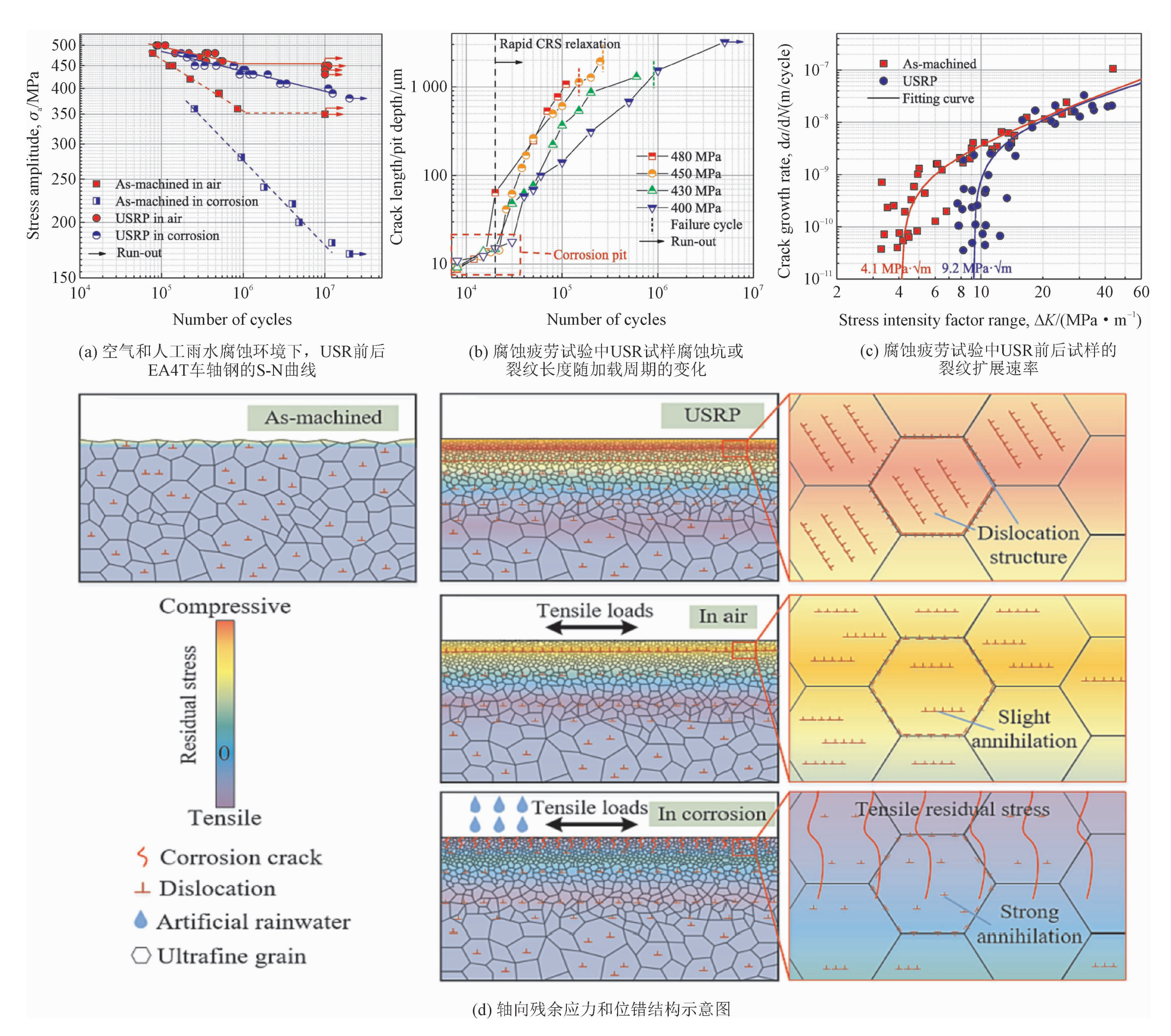


图 19 腐蚀疲劳试验[78]

Fig. 19 Corrosive fatigue tests[78]

3.5 滚动接触疲劳

滚动接触疲劳失效是一种涉及轴承、轧辊和轮箍等滚动接触零件的典型失效模式[24]。滚动接触疲劳损伤受多种因素的影响,包括润滑条件、表面粗糙度、材料力学性能等因素[55]。GAO 等[79]指出,USR 工艺可通过抑制麻点剥落和裂纹扩展,提高 Cr4Mo4V 轴承钢的滚动接触疲劳寿命。LIU 等[80]补充道,在 USR 激光熔覆 Ti6Al4V 合金的 SPD 层中,针状 α 相和 β 纳米组织交错分布,能够有效的调控滚动接触疲劳时裂纹的萌生和扩展方式。ZHANG 等[24]证实表面光洁度的提高也会影响试样

与磨球之间的润滑状况;滚压后界面接触条件由边界接触变化为混合接触,有效降低了应力集中和抑制了裂纹形核。

随着静压力或振动电流(控制超声振幅)的增大,G20Cr2Ni4A 钢的滚动接触疲劳寿命显著提升(图 20a)。一方面,静压力和超声振幅对 CSR 的增效性使得 CSR 幅值大大提高(如 1.1.5 节所论述)。另一方面,较大的静压力可将应力集中点送入更深的位置,增加其裂纹起始的难度;而较高的振动幅值可防止裂纹向外扩散导致的表层剥落和材料损失[81]。不同的是,LIU 等[82]指出 D2 钢中硬度相对较大的珠光体与共析渗碳体之间存在塑性变形不协调,使得滚动接触疲劳裂纹主要在共析渗碳体内部传播。此时,过大的静压力会导致两相界面发生应力集中,为循环加载过程中二次裂纹的萌生提供初始条件,使得其寿命明显降低(图 20b)。QU 等[83]研究了滚压过程中,不同润滑剂黏度对 25CrNi2MoV 钢滚动接触疲劳寿命的影响(图 20c),发现 USR 处理改变了样品表面主要的滚动接触破坏模式。对于未经处理的样品,主要的表面破坏模式是深度剥落破坏;USR 处理后,以浅深度分层破坏为主;随着润滑油黏度的增加,点蚀破坏程度和破坏深度逐渐增大。此外相对于喷丸(SP)来说,由于表面粗糙度差异,USR 在提升滚动接触疲劳方面也存在一定优势。在这种情况下喷丸试样的滚动接触疲劳裂纹以小角度扩展,小角度更容易弱化塑性变形对材料的寿命的提升(图 20d)[84]。综上所述,就 USR 对金属材料的滚动接触疲劳性能提升方面,更多的研究需要着力于 USR 参数优化和滚动接触疲劳断裂失效机理研究。最后,表 2 总结了目前已有的一些 USR 对金属材料疲劳性能的影响,包括疲劳类型、材料种类、尺寸、USR 加工参数、加载条件和性能变化等信息;以期为 USR 金属疲劳研究方面,提供直观的参考。

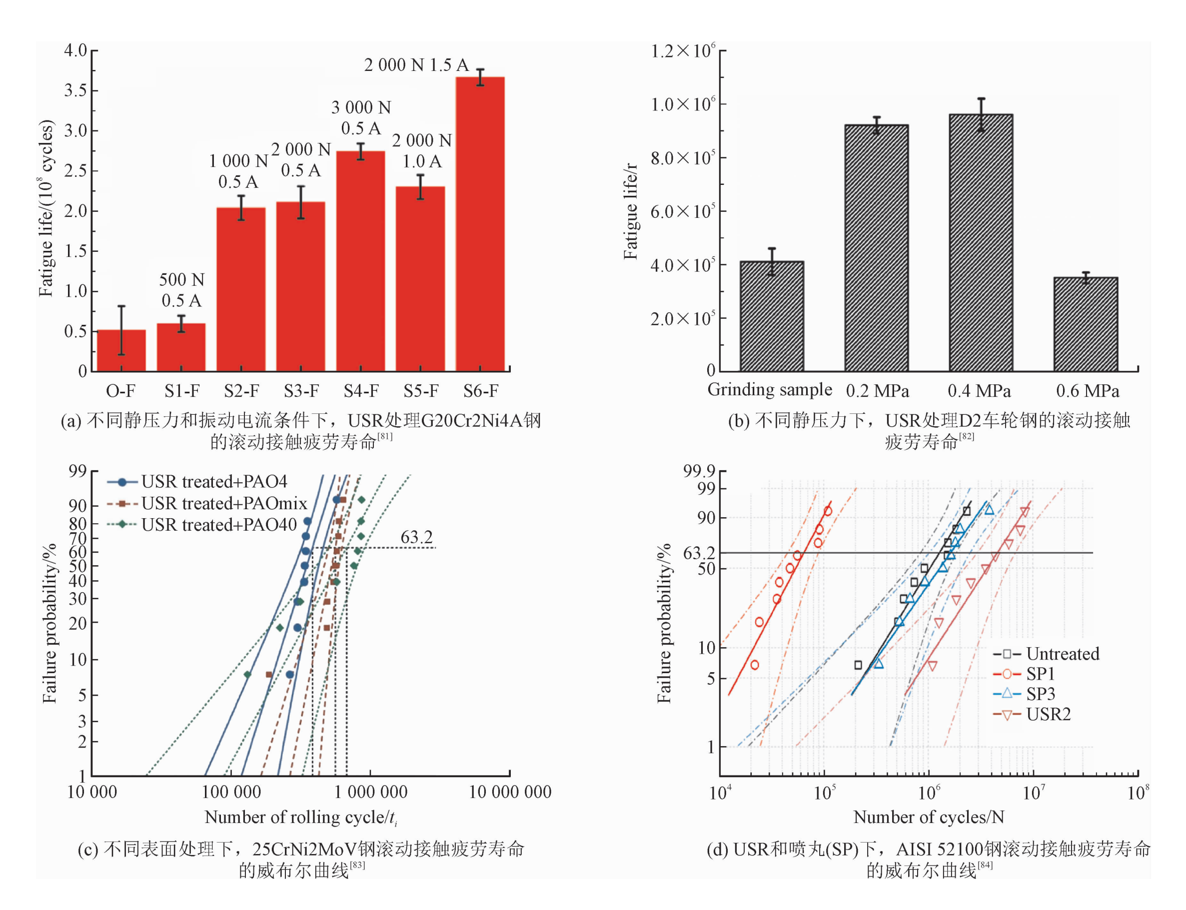


图 20　滚动接触疲劳试验

Fig. 20　Rolling contact fatigue tests

表2 USR处理金属材料的实验条件和疲劳结果总结

Tab.2 Summarization of USR experimental conditions and fatigue results of USR-treated metals

疲劳类型	材料种类	试样尺寸	USR参数	加载条件	性能变化	参考文献
单轴拉压疲劳	IF钢和316L钢	棒状φ6 mm	0.4/0.5 MPa;45 r/min;0.1 mm/r;1/2次	200~400 MPa;$R=-1$;15 Hz;25 ℃	σ_f↑ 18.9%~29.732%(IF钢) σ_f↑ 17.78%~22.22%(316L钢)	[58]
	EA4T车轴钢	棒状φ6 mm	310/620/930 N;6/8/10 μm;60/90/120 r/min;0.08/0.10/0.12 mm/r	330~530 MPa;$R=-1$;36 Hz;25 ℃	σ_f↑ 44.62%	[5]
	51CrV4钢	棒状φ3.4/6.3/8.5 mm	398/663/862 N; 6 μm; 180/280 r/min;0.1 mm/r;3次	870 MPa;$R=-1$;140 Hz;25 ℃	N_f↑ ~9.00倍	[26]
	Ti-6Al-4V钛合金	棒状φ15 mm	600 N;10 μm;120 r/min;0.2 mm/r;20 kHz;1/12次	700/800/850/900 MPa;$R=0.1$;120 Hz;25 ℃	N_f↑ 4.27倍 σ_f↑ 14.29%	[37]
	AerMet100高强钢	棒状	1 500 N;4 μm;600 W;23 mm/s;21 kHz	600 MPa;$R=0.1$;5 Hz;25 ℃	N_f↑ 7.62倍	[3]
	Inconel718镍基合金	棒状φ3.6 mm	0.06/0.10/0.12 MPa;0.6 A;100/140/180 r/min; 0.12/0.14/0.16 mm/r;2次	400 MPa;$R=-1$;25 ℃	N_f↑ 8.04%~716.96%	[48]
	7075铝合金	棒状φ7.5 mm	600 N;7 μm;110 r/min;0.1 mm/r;28.62 kHz	280 MPa;$R=-1$;104 Hz;25 ℃	N_f↑ 7.39倍	[63]
	DD6镍基单晶合金	板件3 mm×1.5 mm	336/420/504 N; 17/25/33 mm/s;20/30/40次	550~840 MPa;650 ℃	N_f↑ 1.30~1.50倍	[66]
	2D12铝合金	棒状φ6 mm	30~40 μm;5~10 mm/s;20 kHz;12次	320/370/450 MPa;$R=0.06$;120 Hz;25 ℃	σ_f↑ 20.00%	[52]
弯曲扭转疲劳	Ti-6Al-4V钛合金	棒状φ6 mm	600 N;10 μm;120 r/min;0.1 mm/r;20 kHz;24次	500~850 MPa;$R=-1$;50 Hz;25 ℃	N_f↑ 23.50倍 σ_f↑ 22.00%	[50]
	7A52-CZ铝合金	板件3.5 mm	35 N;20 μm;250 W;350 mm/min;20 kHz	120/160/200 MPa;$R=-1$;25 Hz;25 ℃	N_f↑ 超过70%	[68]
	TC4钛合金	棒状φ9.5 mm	30/60/90 kg;7~8 μm;1 A;28/70/132 r/min;0.05/0.10/0.15 mm/r;29 kHz;	3000 r/min;260~500 MPa;25 ℃	N_f↑ 3.00~18.00倍 σ_f↑ 51.85%	[29]
	Ti-6Al-4V钛合金	棒状φ6 mm	800 N;5 μm;100/200/300/400 r/min;0.2 mm/r;27 kHz;1次	600/700 MPa;$R=-1$;50 Hz;25 ℃	N_f↑ 2.58~207.33倍	[49]
	12Cr2Ni4A钢	齿轮φ120/65 mm×25 mm;齿根半径3 mm	滚压深度0.03~0.06 mm;2~3.5 μm;3 000 r/min;60~120 mm/min;30.6 kHz;	10~30 kN;$R=0.05$;120 Hz;25 ℃	裂纹扩展阈值↑ 2.10倍 σ_f↑ 36.27%~98.28%	[9]
	Ti-6Al-4V钛合金	棒状φ6 mm	600 N;10 μm;120 r/min;0.1 mm/r;20 kHz;1/3/6/12次	500~800 MPa;$R=-1$;50 Hz;25 ℃	σ_f↑ 28.00%~39.00%	[31]
	45CrNiMoVA钢	棒状φ6 mm	500 N;8 μm;200 r/min;0.028 mm/r;28 kHz	67.4~50.9 N·m;$R=0$;1/2 Hz;20 ℃	N_f↑ 2.50倍	[70]

续表 2

疲劳类型	材料种类	试样尺寸	USR 参数	加载条件	性能变化	参考文献
微动疲劳	Ti-6Al-4V 钛合金	棒状 φ6 mm	600 N;10 μm;120 r/min;0.1 mm/r	轴向 200 ~ 700 MPa;法向 150 MPa;R = −1;35 Hz;25 ℃	σ_f ↑ 72.70%	[11]
	17-4PH 钢	棒状 φ6 mm	800 N;10 μm;70 r/min;0.1 mm/r;28 kHz;1/15 次	轴向 200 ~ 800 MPa;法向 1 300 MPa;R = −1;50 Hz;25 ℃	σ_f ↑ 170.2% ~ 191.9%	[32]
	17-4PH 钢	棒状 φ6 mm	800 N;10 μm;70 r/min;0.1 mm/r;25 kHz;1/3/6 次	轴向 200 ~ 700 MPa;法向 150 MPa;R = −1;35 Hz;25 ℃	N_f ↑ 30.00% ~ 50.00% σ_f ↑ 25.10% ~ 31.70%	[35]
	Ti-6Al-4V 钛合金	棒状 φ6 mm	600 N;10 μm;120 r/min;0.1 mm/r;20 kHz;24 次	轴向 200 ~ 700 MPa;法向 150 MPa;R = −1;35 Hz;25 ℃	N_f ↑ 34.70 倍 σ_f ↑ 113.64%	[71]
	Ti-6Al-4V 钛合金	棒状 φ6 mm	600 N;10 μm;76 r/min;0.12 mm/r;28 kHz;3 次	轴向 650 MPa;法向 85 MPa;R = 0.1;120 Hz;25 ℃	N_f ↑ 520.86%	[72]
	Ti-6Al-4V 钛合金	棒状 φ16 mm	600 N;10 μm;120 r/min;0.2 mm/r;20 kHz;1/12 次	轴向 550 ~ 750 MPa;法向 75 MPa;R = 0.1;120 Hz;25 ℃	N_f ↑ 60.10% ~ 62.10%	[73]
	300M 超高强钢	棒状 φ6 mm	900 N;12 μm;45 r/min;0.08 mm/min;28 kHz	轴向 1 100 MPa;法向 200 MPa;R = 0.1;10 Hz;24 ± 3 ℃	N_f ↑ 373.11%	[76]
腐蚀疲劳	TC11 钛合金	棒状 φ10 mm	0.15 MPa;10 μm;76 r/min;0.1 mm/r	3 000 r/min;R = −1;500 ± 1 ℃;0.1 mg/cm^2 NaCl	N_f ↑ 10.26%	[75]
	300M 超高强钢	棒状 φ6 mm	900 N;12 μm;45 r/min;0.08 mm/min;28 kHz	1 100 MPa;R = 0.1;10 Hz;24 ± 3 ℃;3.5% NaCl	N_f ↑ 2 248.16%	[76]
	7B50-T7751 铝合金	棒状 φ10 mm × 50 mm	500 N;10 μm;75 r/min;0.14 mm/r;28 kHz;3 次	157.5 MPa;R = −1;0.1 Hz;25 ℃;3.5% NaCl	腐蚀速率 ↓ 60.08% σ_f ↑ 117.00%	[77]
	EA4T 车轴钢	沙漏状 φ7.5 mm	1 300 N;10 μm;200 r/min;0.1 mm/r;28 kHz;12 次	R = −1;35 Hz;25 ℃;人工雨水 pH = 6.4	σ_f ↑ 55.00%	[78]
滚动接触疲劳	17Cr2Ni2MoVNb 钢	盘状 φ48 mm × 6 mm	600/800/1000/1 200 N;6 μm;85 r/min;0.012 mm/r;25 kHz;1 次	1 600 r/min;100 N;赫兹接触应力 3.2 GPa;25 ℃	N_f ↑ 99.11% ~ 267.66%	[24]
	C53 钢	盘状 φ45 mm × 6 mm	400/600/800/1 000 N;8 μm;45 r/mm;0.047 mm/r;27 kHz;1 次	1600 r/min;3 kN;2.19 GPa;25 ℃	N_f ↑ 310.10% ~ 1 562.95%	[55]
	Cr4Mo4V 钢	盘状 φ52 mm × 8 mm	2 100 N;0.01 mm/r;8 次	2 040 r/min;3 kN;4.5 GPa;25 ℃	N_f ↑ 185.49%	[79]
	激光熔覆 Ti6Al4V	棒状 φ10 mm × 60 mm	1 000 N;10 μm;0.08 mm/r;30 kHz;8 次	2 000 r/min;450 N;2.363 GPa;25 ℃	N_f ↑ 30.00% ~ 45.00%	[80]
	G20Cr2Ni4A 钢	环状 φ60/42 mm × 10 mm	500/1 000/2 000/3 000 N;0.5/1.0/1.5 A;0.06 mm/r;1 次	2 200 r/min;4.5 GPa;25 ℃	N_f ↑ 20.00% ~ 610.00%	[81]
	D2 车轮钢	轮轨状 φ60/54 mm × 20 mm	0.2/0.4/0.6 MPa;70 r/min;0.05 mm/r	1 440 r/min;1.45 GPa;25 ℃	N_f ↓ 20.00% ~ N_f ↑ 134.15%	[82]
	25CrNi$_2$MoV 钢	盘状 φ42 mm × 6 mm	900 N;12 μm;85 r/min;85 r/min;25 kHz	134 N;3.5 GPa;25 ℃	N_f ↑ 297.98%	[83]
	AISI 52100 钢	盘状 φ48 mm × 6 mm	800/1 000 N;6 μm;25 kHz	1 600 ± 10 r/min;357.1 N;5.4 GPa;25 ℃	N_f ↑ 258.29%	[84]

4 复合强化

近年来,在传统 USR 的基础上,报道了大量的 USR 的辅助手段,以及 USR 与其他塑性变形工艺相结合的复合强化策略。目前,这些手段主要包括电脉冲辅助 USR、热辅助 USR、USR 与表面渗碳/喷丸、铣削相结合的复合工艺等。相比于传统 USR,这些工艺优化在表面组织改性、表面硬化和疲劳寿命提升方面存在一定的优势。例如,电脉冲在金属材料塑性加工中的应用:由于电脉冲加速相变、位错迁移率和原子扩散加剧,材料的加工硬化和缺陷数量显著减少,可以降低变形抗力,并显著提高零件的表面质量[85]。而喷丸与 USR 相结合则可实现二者的优势互补(在降低表面粗糙度的同时提供高幅值 CSR 梯度)。因此本节主要总结了以上提及与 USR 联用的工艺,以及其对材料变形机制和机械性能的影响。表 3 总结了与 USR 相关的复合强化优缺点以及性能变化,以期为 USR 复合强化研究方面,提供较为直观的参考。

表 3 USR 复合强化的目的、优点以及性能变化总结

Tab. 3 Summarization of incentives, advantages and property variations of USR composite strengthening

强化名称	复合强化目的	优点	性能变化	参考文献
电脉冲辅助 USR	USR 诱导的加工硬化会成为金属内部进一步塑性变形和强化的阻碍因素。由于现存的高硬度,表面强化层在后续的强化过程中没有大幅度的改善;反而可能恶化原有的强化效果。为了进一步提高表面强化程度,采用电脉冲辅助 USR 对材料进行处理。	在金属材料的表面塑性加工中,使用电脉冲可以降低变形阻力,并显著提高组件的表面质量;电脉冲可加速材料中的相变过程、位错迁移率和原子扩散,降低加工硬化程度,减少缺陷量。	相对于传统 USR σ_f ↑ 8.33% ~32.71%	[85-90]
热辅助 USR	随着载荷、温度和时间的推移,SPD 层的强化效应会逐渐消失。因此,为了提高强化层在服役过程中的稳定性,采用热辅助 USR 对材料进行处理。	热辅助表面形变强化可以通过动态应变时效作用和动态沉淀作用,显著提高 CSR 的稳定性。	相对于传统 USR N_f ↑ 6.55% ~196.07%	[91-93]
USR 复合渗碳	为了隔离材料与腐蚀介质,提高材料的抗腐蚀性能,在材料表面添加了富碳涂层。为了提高材料的力学性能,并且增加涂层与材料基体的结合强度,使用 USR 对渗碳材料进行处理。	同时显著提高材料的腐蚀性能和力学性能,大大拓展了材料的应用范围。	相对于传统 USR σ_f ↑ 125.49%	[94-95]
USR 复合喷丸/激光冲击	为了同步降低表面粗糙度和提供高幅值 CSR 梯度,并降低材料表面孔隙率,使用 USR 复合喷丸/激光冲击对材料进行处理。	主要优点是它产生良好的表面平整度和较大的 CRS 幅值。	相对于传统 USR N_f ↓ 86.94% ~ N_f ↑ 33.93%	[51,56,96]
USR 复合铣削	为了设计存在特定结构的部件,并且对该部件进行表面强化,以及初步对材料毛坯表面质量进行处理,使用 USR 复合铣削的方法。	将 USR 的应用范围从材料级上升到了构件级。可显著提高构件的表面质量。	相对于传统 USR CRS ↑ 27% ~172%	[97]

4.1 电脉冲辅助 USR

图 21(a,b)分别为杆件曲面和圆盘平面的电脉冲辅助 USR 工艺设置示意图[85-86]。图 21(a)的电流结构为单独在滚压靶材上通电,而图 21(b)为在刀具和靶材之间建立了电流循环,他们都能在 USR 过程中为材料提供有效电流。XIE 等[86]比较了传统 USR 和电脉冲辅助 USR 处理 CrMnFeCoNi 高熵合金的塑性变形机制,发现孪晶强化和位错强化分别在二者中占主导地位。后者相对前者的机制转化可归因于以下两点:① 电脉冲作用可诱导瞬时高温和电塑性的产生,瞬时高温减小了层错宽度,增加了层错能;导致塑性变形以位错滑移的形式进行,并抑制孪生现象;②电子的定向运动为位错提供了额外的驱动力,从而促进位错的定向排列,促进了位错增殖,进而形成位错墙。

而其他学者[85-87]则认为电脉冲同时具有热效应和非热效应,均都对位错迁移率和原子扩散有积极影响。由于克服了迁移能垒,热效应产生的一定温度可以提供活化能,促进位错迁移和原子扩散。在

非热效应方面,已有研究表明晶体缺陷的形成始于其电子结构的畸变,固体中电子密度分布的明显畸变使塑性变形更容易发展[88]。当电脉冲作用于金属材料时,金属内部电子与外电场之间的强迫振荡效应相互作用,最终会导致试样内部电子结构发生严重的瞬时畸变[89-90]。因此,强化电流密度或提高电流频率可以显著提高位错的迁移率,大大增强金属材料的塑性变形能力和疲劳寿命(图 21c ~ f)。

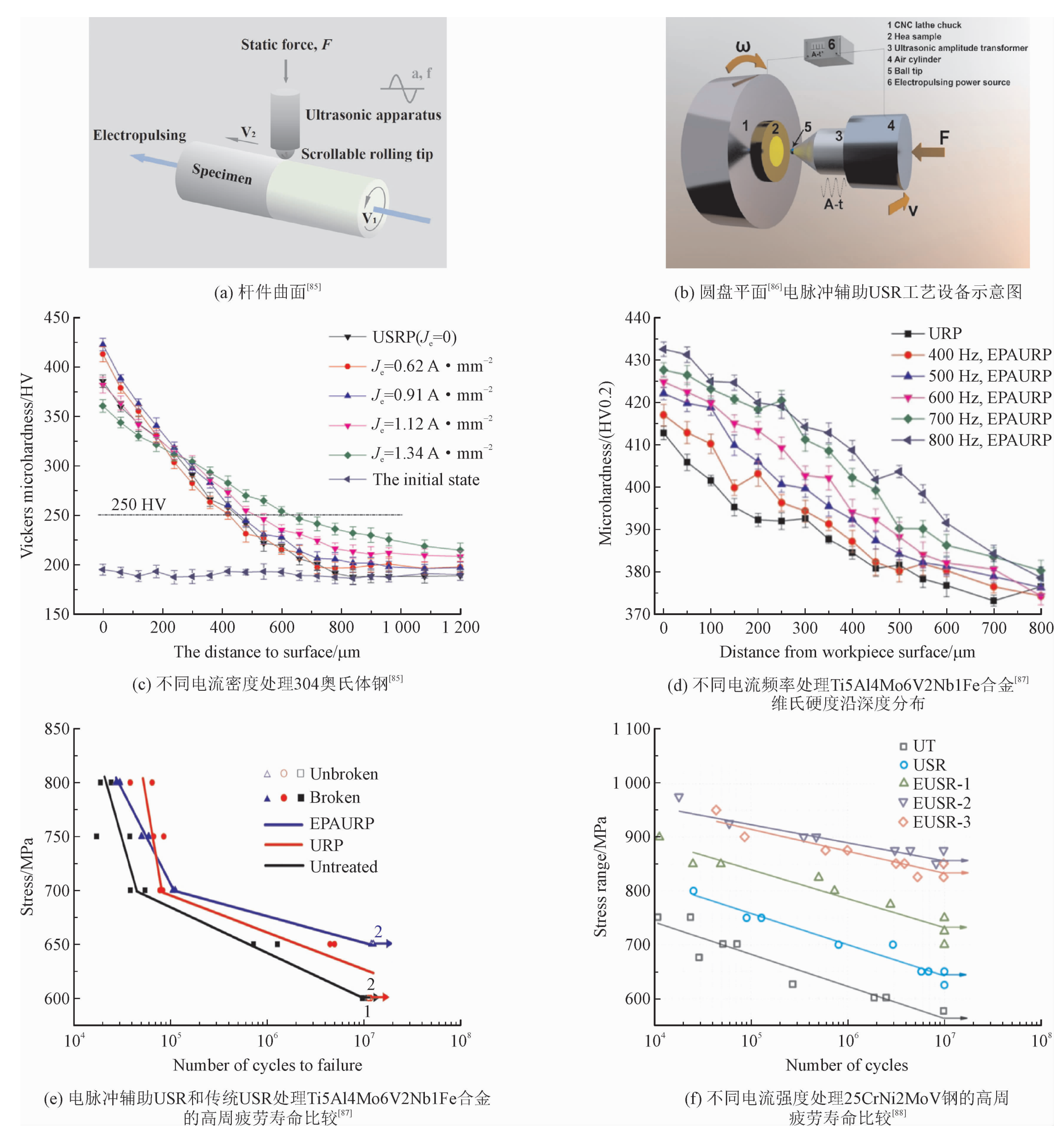


图 21　电脉冲辅助 USR

Fig. 21　Electropulsing-assisted USR

4.2　热辅助 USR

对于钛合金和高强钢等在室温下产生塑性变形较为困难的材料而言,提高加工温度是降低塑性变形抗力的最佳选择之一[91]。在 USR 过程中,热辅助可以诱发动态应变时效和动态沉淀作用,从而形成了高密度的位错和“位错钉扎”效应,可大大提高 CRS 的稳定性[92]。LIU 等[91]在对 Ti6Al4V 合金进行滚压的同时,采用配备 U 型感应线圈的高频感应加热电源对样品进行加热(图 22a ~ b);发现随着滚压温度的升高,材料表面的空隙逐渐消失,使得材料的疲劳性能逐步提高(图 22c)。LUAN 等[92]则认为热驱动和高应变率使得原子扩散剧烈,引起的塑性变形相对传统 USR 较大;同时,在热环境中更难以

恢复变形和释放应力,使得 CRS 趋于稳定。相反,LUO 等[93]研究了低温耦合 USR 对 Ti6Al4V 合金的影响,结果表明低温处理将 USR 试样内的 β 相含量降低 3%。由于 α 相为密排六方结构,滑移系较少,而 β 相为体心立方结构,滑移系较多。相对于体心立方结构,密排六方结构中形成的位错不易滑移。因此,使得其表面硬度和疲劳强度显著提高(图 22d)。综上可知,在热辅助 USR 过程中,不同温度对 USR 处理材料的作用机理不同,其性能变化程度也有所差异。

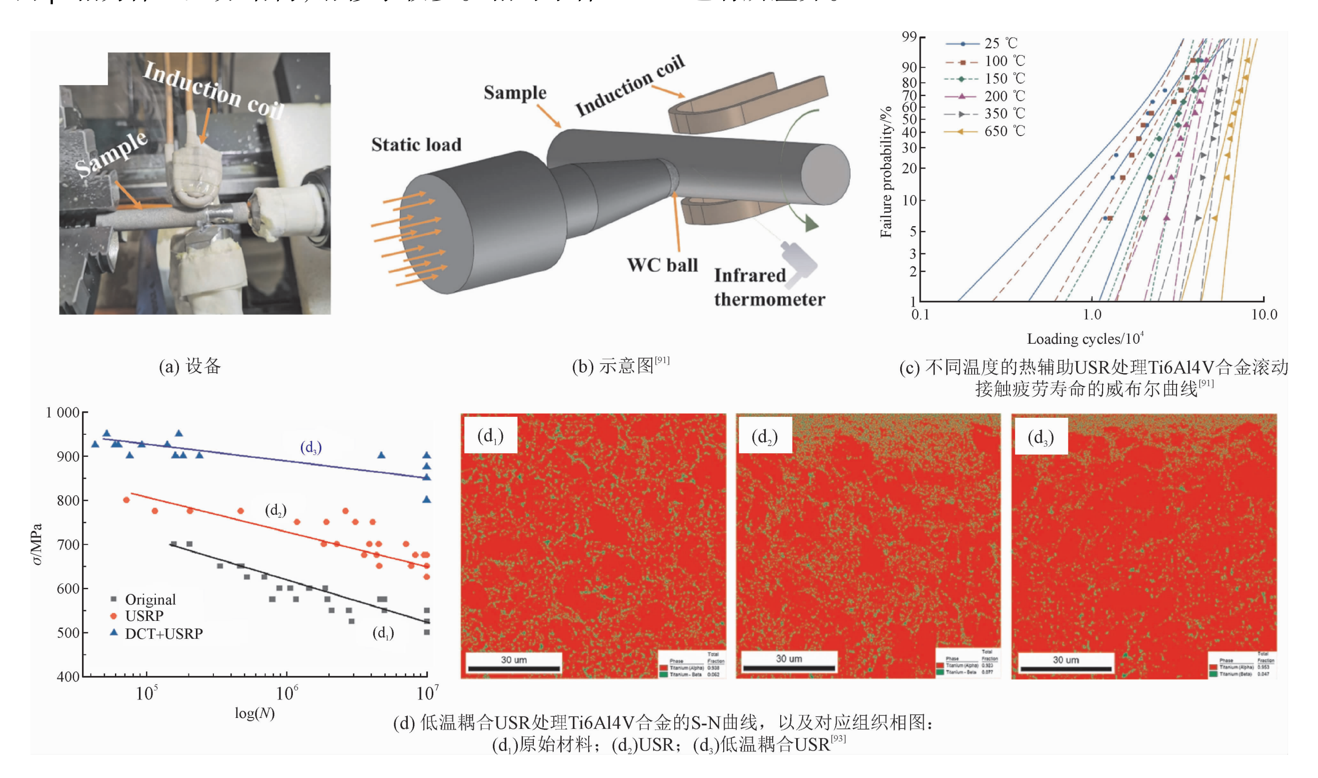


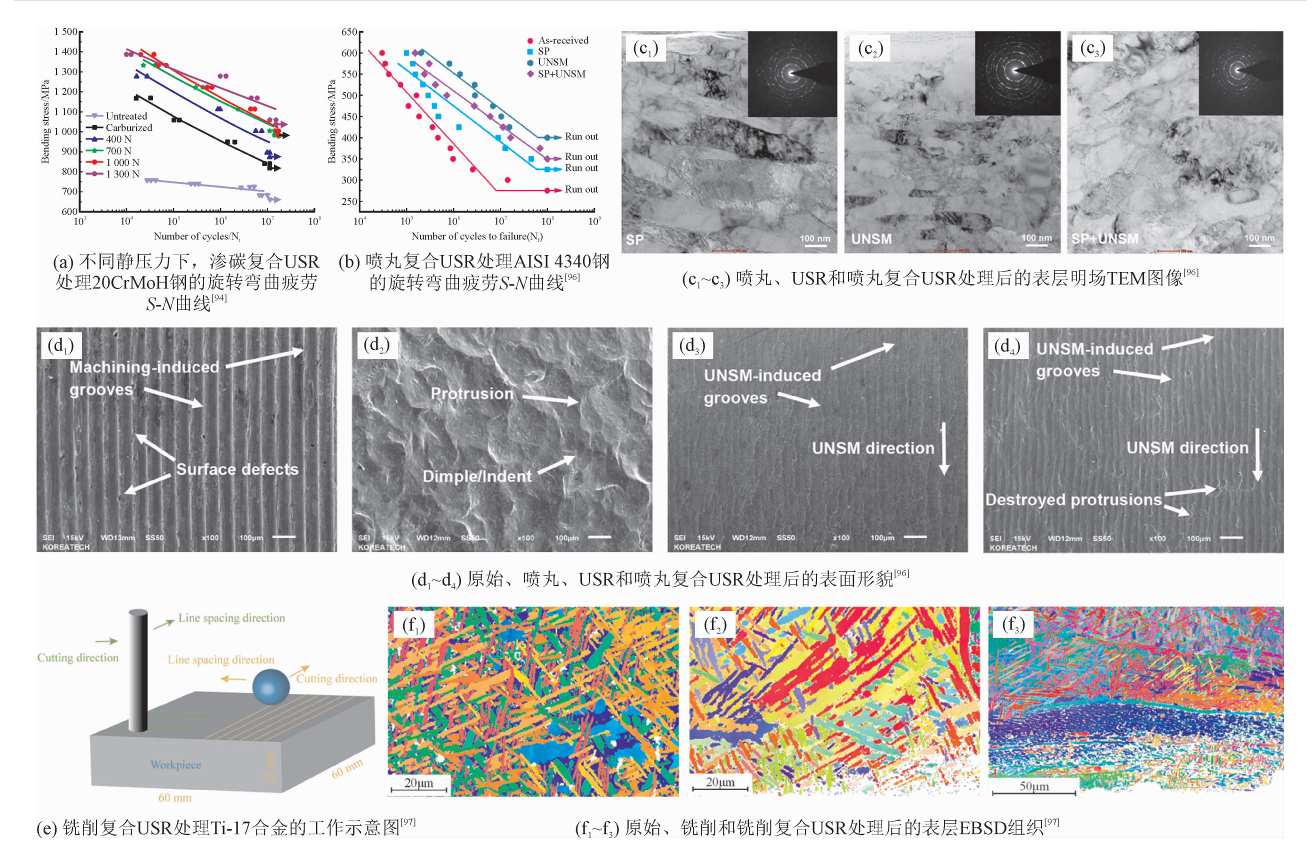
图 22 热辅助 USR

Fig. 22 Heating-assisted USR

4.3 与其他工艺复合

USR 具有较优良的融合性,可与其他工艺复合使用,并表现出更为良好的疲劳强度和耐磨性能。其中,WANG 等[94]将渗碳复合 USR 工艺应用到了 20CrMoH 钢上,研究了不同静压力对渗碳钢弯曲疲劳行为的影响。结果显示渗碳后,材料的疲劳极限提高 29%;随着滚压静压力的增加,疲劳极限进一步提高(图 23a)。作者认为渗碳复合 USR 产生的高幅值 CRS 和显微硬度造成了该强化。类似的现象也在文献[95]中发现了;其将渗碳后的材料强化归因于应变诱导马氏体相变和碳原子的固溶强化,而将渗碳复合 USR 后的材料强化归因于位错强化和应力强化。

除了渗碳外,USR 还可与其他严重恶化表面粗糙度的工艺复合使用,可实现在降低表面粗糙度的同时提供高幅值 CSR 梯度的目的。ZHANG 等[57]研究了喷丸复合 USR 工艺对 17Cr2Ni2MoVNb 钢滚动疲劳性能的影响,发现复合强化后,材料表层晶粒和第二相粒子细化程度较高,使得其对疲劳性能提升效果比单独喷丸或单独 USR 作用效果好。然而 KARIMBAEV 等[96]对 AISI 4340 钢的实验结果却表明,疲劳强度排序为:滚压 > 复合强化 > 喷丸 > 原始材料,如图 23(b)所示。相对于喷丸而言,USR 在马氏体板条细化(图 23c_1,c_2)和降低表面粗糙度(图 23d_2,d_3)方面存在较大的优势。而复合强化后二者的效能还不及单独的 USR 处理(图 23c_2,c_3,d_3,d_4)。因此,复合工艺的强化效果有所削弱。另外,ZHOU 等[97]探索了铣削复合 USR 过程中 Ti-17 合金 β 相的演变,指出铣削表面针状 β 粒子尺寸增大,而复合强化使其尺寸在原始的基础上大大减小,并且还出现织构分层。该现象对其疲劳性能存在较大的影响。由上述结果可知,合理调控 USR 的复合工艺,可为增加材料疲劳性能的提高程度提供新的思路。



(a) 不同静压力下，渗碳复合USR处理20CrMoH钢的旋转弯曲疲劳 S-N曲线[94]

(b) 喷丸复合USR处理AISI 4340钢的旋转弯曲疲劳S-N曲线[96]

(c_1~c_3) 喷丸、USR和喷丸复合USR处理后的表层明场TEM图像[96]

(d_1~d_4) 原始、喷丸、USR和喷丸复合USR处理后的表面形貌[96]

(e) 铣削复合USR处理Ti-17合金的工作示意图[97]

(f_1~f_3) 原始、铣削和铣削复合USR处理后的表层EBSD组织[97]

图 23　USR 与其他工艺复合使用

Fig. 23　USR is used in combination with other processes

5　总结与展望

本研究总结了 USR 参数对金属材料 CRS、表面状态和微观组织的影响;分析了不同 USR 参数作用下的强化机制和疲劳寿命的演变,以及与 USR 相关的复合强化技术。USR 参数对 CRS、表面状态和微观组织有着显著影响,尽管关于 USR 工艺参数对金属材料疲劳强度的影响有大量的报道,但是由于 USR 工艺参数变化会导致影响层随之变化,从而使其表现出不同的表面性能。因此,USR 优化疲劳性能的研究和发展依然还有很长的路要走。

此外,USR 仿真可以减少昂贵的试验需求,并有助于获得特定应用的最优参数。同时,它可以为 USR 材料的残余应力预测提供非常有用的信息。根据 USR 的一些关键因素,可以得到动态应力场和残余应力场。因此,在已有的定性结果上发现量化数学模型,更有利于指导工业生产,这将是今后 USR 延长疲劳寿命研究的一个重要方向。

参考文献:

[1] LIU D, LIU D X, ZHANG X H, et al. Surface nanocrystallization of 17-4 precipitation-hardening stainless steel subjected to ultrasonic surface rolling process[J]. Materials science and engineering: A, 2018, 726: 69-81.

[2] XIA T T, ZENG L F, ZHANG X H, et al. Enhanced corrosion resistance of a Cu10Ni alloy in a 3.5 wt% NaCl solution by means of ultrasonic surface rolling treatment[J]. Surface and coatings technology, 2019, 363: 390-399.

[3] MINGLONG C, DEYUAN Z, HUAWEI C, et al. Surface nanocrystallization and its effect on fatigue performance of high-strength materials treated by ultrasonic rolling process[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 83(1): 123-131.

[4] BOZDANA A T, GINDY N N Z. Comparative experimental study on effects of conventional and ultrasonic deep cold rolling processes on Ti-6Al-4V[J]. Materials science and technology, 2008, 24(11): 1378-1384.

[5] QIN T Y, AO N, REN X Y, et al. Determination of optimal ultrasonic surface rolling parameters to enhance the fatigue strength of railway axle EA4T steel[J]. Engineering fracture mechanics, 2022, 275: 108831.

[6] TANG J Y, SHI Y, ZHAO J Y, et al. Numerical modeling considering initial gradient mechanical properties and experiment verification of residual stress distribution evolution of $12Cr_2Ni_4A$ steel generated by ultrasonic surface rolling[J]. Surface and coatings technology, 2023, 452: 129127.

[7] WANG F, MEN X H, LIU Y J, et al. Experiment and simulation study on influence of ultrasonic rolling parameters on residual stress of Ti-6Al-4V alloy[J]. Simulation modelling practice and theory, 2020, 104: 102121.

[8] LIU J B, ZHANG X H, CUI Z Y, et al. Experimental investigation on ultrasonic surface rolling of Inconel 690TT[J]. Materials and manufacturing processes, 2021, 36(10): 1208-1217.

[9] LAN S L, QI M, ZHU Y F, et al. Ultrasonic rolling strengthening effect on the bending fatigue behavior of $12Cr_2Ni_4A$ steel gears [J]. Engineering fracture mechanics, 2023, 279: 109024.

[10] 任学冲,陈利钦,刘鑫贵,等. 表面超声滚压处理对高速列车车轴钢疲劳性能的影响[J]. 材料工程, 2015, 43(12): 1-5.
REN Xuechong, CHEN Liqin, LIU Xingui, et al. Effects of surface ultrasonic rolling processing on fatigue properties of axle steel used on high speed train[J]. Journal of materials engineering, 2015, 43 (12): 1-5(in Chinese).

[11] LIU C S, LIU D X, ZHANG X H, et al. Effect of the ultrasonic surface rolling process on the fretting fatigue behavior of Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials, 2017, 10(7): 833.

[12] YANG J, LIU D X, ZHANG X H, et al. The effect of ultrasonic surface rolling process on the fretting fatigue property of GH4169 superalloy[J]. International journal of fatigue, 2020, 133: 105373.

[13] 毛森东. 超声滚压对 Ti-6Al-4V 合金高低周疲劳性能影响研究[D]. 上海:华东理工大学, 2018.

[14] 邹江河. 超声表面深滚对 40CrNiMoA 钢表面完整性及微动疲劳性能的影响[D]. 贵阳:贵州大学, 2022.

[15] 王震. 激光选区熔化 Ti6Al4V 合金及其表面超声滚压加工的组织与性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019.

[16] 赵波,姜燕,别文博. 超声滚压技术在表面强化中的研究与应用进展[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 37-62.
ZHAO Bo, JIANG Yan, BIE Wenbo. Ultrasonic rolling technology in surface strengthening: progress in research and applications[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica, 2020, 41(10): 37-62(in Chinese).

[17] 巩立超,潘永智,刘彦杰,等. 超声滚压轴承套圈表面强化的研究综述[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 203-213.
GONG Lichao, PAN Yongzhi, LIU Yanjie, et al. Surface strengthening of ultrasonic rolling bearing rings[J]. Surface technology, 2022, 51(8): 203-213(in Chinese).

[18] ZHENG J X, LIU H W, REN Y C, et al. Effect of two-dimensional ultrasonic rolling on grain size and micro-hardness of 7075 aluminum alloy[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2020, 106(1): 503-510.

[19] LIU Y, ZHAO X, WANG D. Effective FE model to predict surface layer characteristics of ultrasonic surface rolling with experimental validation[J]. Materials science and technology, 2014, 30(6): 627-636.

[20] LU L X, SUN J, LI L, et al. Study on surface characteristics of 7050-T7451 aluminum alloy by ultrasonic surface rolling process [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 87(9): 2533-2539.

[21] JOHN M, RALLS A M, DOOLEY S C, et al. Ultrasonic surface rolling process: properties, characterization, and applications[J]. Applied sciences, 2021, 11(22): 10986.

[22] SUN Q, YANG M, JIANG Y, et al. Achieving excellent corrosion resistance properties of 7075 Al alloy via ultrasonic surface rolling treatment[J]. Journal of alloys and compounds, 2022, 911: 165009.

[23] LIU Z H, ZHAO H, ZHANG C H, et al. Investigation on the evolution of residual stress in ultrasonic surface rolling treatment-processed 18CrNiMo7-6 alloy steel[J]. Transactions of the indian institute of metals, 2023, 76(3): 777-785.

[24] ZHANG Y L, LAI F Q, QU S G, et al. Effect of ultrasonic surface rolling on microstructure and rolling contact fatigue behavior of 17Cr2Ni2MoVNb steel[J]. Surface and coatings technology, 2019, 366: 321-330.

[25] ZHENG J X, SHANG Y J, GUO Y L, et al. Analytical model of residual stress in ultrasonic rolling of 7075 aluminum alloy[J]. Journal of manufacturing processes, 2022, 80: 132-140.

[26] XU C X, LIANG Y L, YANG M, et al. Effects of the ultrasonic assisted surface rolling process on the fatigue crack initiation position distribution and fatigue life of 51CrV4 spring steel[J]. Materials, 2021, 14(10): 2565.

[27] LI F Q, ZHAO B, LAN S L, et al. Experiment and simulation of the effect of ultrasonic rolling on the surface properties of Ti-6Al-4V[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2020, 106(5): 1893-1900.

[28] LIU Z H, ZHANG C H, ZHAO H, et al. Theoretical analysis and performance prediction on modified surface layer caused by ultrasonic surface rolling[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2021, 113(5): 1307-1330.

[29] ZHU X T, LIU P T, ZHANG C, et al. Study on surface integrity and fatigue properties of TC4 titanium alloy by surface ultrasonic rolling [J]. Materials, 2023, 16(2): 485.

[30] LIU P T, WANG R, LIU X D, et al. Effect of surface ultrasonic rolling on evolution of surface microstructure of EA4T axle steel[J]. Journal of materials engineering and performance, 2021, 30(2): 1270-1279.

[31] LIU C S, LIU D X, ZHANG X H, et al. On the influence of ultrasonic surface rolling process on surface integrity and fatigue performance of Ti-6Al-4V alloy[J]. Surface and coatings technology,

2019,370:24-34.

[32] LIU D,LIU D X,ZHANG X H,et al. An investigation of fretting fatigue behavior and mechanism in 17-4PH stainless steel with gradient structure produced by an ultrasonic surface rolling process[J]. International journal of fatigue,2020,131:105340.

[33] LUO X,REN X P,JIN Q,et al. Microstructural evolution and surface integrity of ultrasonic surface rolling in Ti6Al4V alloy[J]. Journal of materials research and technology,2021,13:1586-1598.

[34] 徐红玉,刘立波,崔凤奎. 风电轴承套圈超声滚压强化残余应力形成规律分析[J]. 塑性工程学报,2019,26(5):125-132.
XU Hongyu,LIU Libo,CUI Fengkui. Analysis of residual stress formation in ultrasonic rolling strengthening of wind power bearing rings[J]. Journal of plasticity engineering,2019,26(5):125-132 (in Chinese).

[35] LIU D,LIU D X,ZHANG X H,et al. Plain fatigue and fretting fatigue behaviors of 17-4PH steel subjected to ultrasonic surface rolling process:a comparative study[J]. Surface and coatings technology,2020,399:126196.

[36] YANG J,LIU D X,REN Z C,et al. Grain growth and fatigue behaviors of GH4169 superalloy subjected to excessive ultrasonic surface rolling process[J]. Materials science and engineering: A, 2022,839:142875.

[37] AO N,LIU D X,ZHANG X H,et al. Surface rolling deformed severity-dependent fatigue mechanism of Ti-6Al-4V alloy[J]. International journal of fatigue,2022,158:106732.

[38] WU S D,WANG Z G,JIANG C B,et al. Scanning electron microscopy-electron channelling contrast investigation of recrystallization during cyclic deformation of ultrafine grained copper processed by equal channel angular pressing[J]. Philosophical magazine letters, 2002,82(10):559-565.

[39] WITNEY A B,SANDERS P G,WEERTMAN J R,et al. Fatigue of nanocrystalline copper[J]. Scripta metallurgica et materialia, 1995,33(12):2025-2030.

[40] FAN G J,FU L F,WANG Y D,et al. Uniaxial tensile plastic deformation of a bulk nanocrystalline alloy studied by a high-energy x-ray diffraction technique[J]. Applied physics letters, 2006, 89 (10):101918.

[41] YAMAKOV V,WOLF D,PHILLPOT S R,et al. Dislocation processes in the deformation of nanocrystalline aluminium by molecular-dynamics simulation[J]. Nature materials,2002,1(1):45-49.

[42] ASTM International. Symposium on basic mechanisms of fatigue: STP237-EB[S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International,1959.

[43] ASTM International. Engineering analysis of the inelastic stress response of a structural metal under variable cyclic strains: STP38034S[S]. West Conshohocken,PA,USA:ASTM International,1971.

[44] KODAMA S. The behavior of residual stress during fatigue stress cycles[C]//Proceedings of the International Conference on Mechanical Behavior of Metals II. [S. l.]:[s. n.],1972:111-118.

[45] HAN S,LEE T,SHIN B. Residual stress relaxation of welded steel components under cyclic load[J]. Steel research international, 2002,73(9):414-420.

[46] ZHUANG W Z,HALFORD G R. Investigation of residual stress relaxation under cyclic load[J]. International journal of fatigue, 2001,23(S1):31-37.

[47] MEGUID S A,SHAGAL G,STRANART J C,et al. Relaxation of peening residual stresses due to cyclic thermo-mechanical overload [J]. Journal of engineering materials and technology, 2005, 127 (2):170-178.

[48] 何婧,赵飞,王稼林,等. 表面超声滚压工艺参数对 Inconel718 疲劳寿命的影响[J]. 热加工工艺,2017,46(10):108-111.
HE Jing,ZHAO Fei,WANG Jialin,et al. Effect of surface ultrasonic rolling process parameters on fatigue life of Inconel 718[J]. Hot working technology,2017,46(10):108-111(in Chinese).

[49] PANG Z W,WANG S X,YIN X L,et al. Effect of spindle speed during ultrasonic rolling on surface integrity and fatigue performance of Ti6Al4V alloy[J]. International journal of fatigue,2022, 159:106794.

[50] LIU C S,LIU D X,ZHANG X H,et al. Improving fatigue performance of Ti-6Al-4V alloy via ultrasonic surface rolling process[J]. Journal of materials science & technology, 2019, 35 (8): 1555-1562.

[51] MALEKI E,BAGHERIFARD S,UNAL O,et al. Superior effects of hybrid laser shock peening and ultrasonic nanocrystalline surface modification on fatigue behavior of additive manufactured AlSi10Mg [J]. Surface and coatings technology,2023,463:129512.

[52] LI Y Y,XU P W,JIANG W,et al. Effect of gradient microstructure on elevated temperature mechanical properties of Ni-based superalloy ATI 718Plus[J]. Materials science and engineering:A,2022, 843:143124.

[53] 丛家慧,王磊,徐永臻 ,等. 超声滚压强化对 2D12 铝合金疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2022,51(1):113-118.
CONG Jiahui,WANG Lei,XU Yongzhen,et al. Influence of ultrasonic surface rolling on fatigue behavior of 2D12 aluminum alloy [J]. Rare metal materials and engineering,2022,51(1):113-118.

[54] KONDAVALASA S R, PRAKASH A, JAGTAP R, et al. On the comparison of graded microstructures developed through high reduction (per pass) cold rolling (HRCR) and ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) in nickel-base alloy 602CA[J]. Materials characterization,2019,153:328-338.

[55] WANG H B,YANG X H,LI H,et al. Enhanced fatigue performance and surface mechanical properties of AISI 304 stainless steel induced by electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling process [J]. Journal of materials research,2018,33(22):3827-3840.

[56] 马梦阳,李小强,赖福强,等. 表面超声滚压加工对配气机构凸

轮轴材料滚动接触疲劳性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(9):2430-2441.
MA Mengyang, LI Xiaoqiang, LAI Fuqiang, et al. Effect of surface ultrasonic rolling processing on rolling contact fatigue performance of camshaft material of valve train[J]. Journal of Central South University(science and technology),2020,51(9):2430-2441(in Chinese).

[57] ZHANG Y L, QU S G, LU F, et al. Microstructures and rolling contact fatigue behaviors of 17Cr2Ni2MoVNb steel under combined ultrasonic surface rolling and shot peening[J]. International journal of fatigue,2020,141:105867.

[58] WANG H B, SONG G L, TANG G Y. Effect of electropulsing on surface mechanical properties and microstructure of AISI 304 stainless steel during ultrasonic surface rolling process[J]. Materials science and engineering:A,2016,662:456-467.

[59] GAO X K, LI B C, JIANG C. The critical assessment for the fatigue limit of nanocrystallized surface with micro-notches obtained by ultrasonic surface rolling processing[J]. International journal of fatigue,2021,143:105988.

[60] 张飞,赵运才. 超声表面滚压改善45#钢表层特性及疲劳性能的研究[J]. 表面技术,2017,46(9):185-190.
ZHANG Fei, ZHAO Yuncai. Research on surface characteristics and fatigue properties of 45# steel by ultrasonic surface rolling[J]. Surface technology,2017,46(9):185-190(in Chinese).

[61] 袁建梁. 超声表面机械滚压处理对6061铝合金及其搅拌摩擦焊接头疲劳行为影响[D]. 太原:太原理工大学,2019.

[62] XUE X M, XU S B, MA X Q, et al. Surface microstructure refinement and mechanical properties of GCr15 steels improved during ultrasonic surface rolling processing[J]. Materials research,2023,26:e20220606.

[63] 白娜,赖刘生,邓广. 超声表面滚压对7075铝合金疲劳行为的影响[J]. 兵器材料科学与工程,2021,44(5):126-130.
BAI Na, LAI Liusheng, DENG Guang. Influence of ultrasonic surface rolling on fatigue behavior of 7075 aluminum alloy[J]. Ordnance material science and engineering,2021,44(5):126-130(in Chinese).

[64] YE H, SUN X, LIU Y, et al. Effect of ultrasonic surface rolling process on mechanical properties and corrosion resistance of AZ31B Mg alloy[J]. Surface and coatings technology,2019,372:288-298.

[65] LIU D, LIU D X, GUAGLIANO M, et al. Contribution of ultrasonic surface rolling process to the fatigue properties of TB8 alloy with body-centered cubic structure[J]. Journal of materials science & technology,2021,61:63-74.

[66] 夏天成,杨晓峰,邵照宇,等. 超声滚压工艺对镍基单晶高温合金DD6表面完整性和疲劳寿命的影响[J]. 表面技术,2024,53(1):182-191.
XIA Tiancheng, YANG Xiaofeng, SHAO Zhaoyu, et al. Effect of ultrasonic rolling process on surface integrity and fatigue life of nickel-based single crystal superalloy DD6[J]. Surface technology,2024,53(1):182-191(in Chinese).

[67] 彭翔. 表面超声滚压对Inconel718高温合金拉-拉疲劳极限影响规律研究[D]. 贵阳:贵州大学,2022..

[68] YE X L, ZHU Y L, ZHANG D H. Effects of ultrasonic deep rolling on fatigue performance of pre-corroded 7A52 aluminum alloy[J]. Advanced materials research,2011,189-193:897-900.

[69] 张飞,上官绪超. 表面超声滚压处理对AISI304不锈钢疲劳性能的影响[J]. 热加工工艺,2017,46(16):136-140.
ZHANG Fei, SHANGGUAN Xuchao. Effect of surface ultrasonic rolling processing on fatigue properties of AISI304 austenite stainless steel[J]. Hot working technology,2017,46(16):136-140(in Chinese).

[70] LIANG Z Q, LI Z K, LI X Z, et al. Experimental study on surface integrity and fatigue life of an ultra-high strength steel by the composite strengthening process of pre-torsion and ultrasonic rolling[J]. Engineering failure analysis,2023,150:107333.

[71] LIU C S, LIU D X, ZHANG X H, et al. Fretting fatigue characteristics of Ti-6Al-4V alloy with a gradient nanostructured surface layer induced by ultrasonic surface rolling process[J]. International journal of fatigue,2019,125:249-260.

[72] FAN K F, LIU D X, ZHANG X H, et al. Effect of residual stress induced by ultrasonic surface rolling on fretting fatigue behaviors of Ti-6Al-4V alloy[J]. Engineering fracture mechanics,2022,259:108150.

[73] AO N, LIU D X, ZHANG X H, et al. Improved fretting fatigue mechanism of surface-strengthened Ti-6Al-4V alloy induced by ultrasonic surface rolling process[J]. International journal of fatigue,2023,170:107567.

[74] WANG C Y, LUO K Y, BU X Y, et al. Laser shock peening-induced surface gradient stress distribution and extension mechanism in corrosion fatigue life of AISI 420 stainless steel[J]. Corrosion science,2020,177:109027.

[75] SHI H L, LIU D X, JIA T Y, et al. Effect of the ultrasonic surface rolling process and plasma electrolytic oxidation on the hot salt corrosion fatigue behavior of TC11 alloy[J]. International journal of fatigue,2023,168:107443.

[76] ZHAO W D, LIU D X, ZHANG X H, et al. Improving the fretting and corrosion fatigue performance of 300M ultra-high strength steel using the ultrasonic surface rolling process[J]. International journal of fatigue,2019,121:30-38.

[77] XU X C, LIU D X, ZHANG X H, et al. Mechanical and corrosion fatigue behaviors of gradient structured 7B50-T7751 aluminum alloy processed via ultrasonic surface rolling[J]. Journal of materials science & technology,2020,40:88-98.

[78] LI H, ZHANG J W, AO N, et al. Influence of residual stress and its relaxation on the corrosion bending fatigue resistance of EA4T axle

steel treated by ultrasonic surface rolling[J]. International journal of fatigue,2023,170:107561.

[79] GAO F,DUAN H,DING Z,et al. Enhanced surface properties and contact fatigue performance of Cr4Mo4V bearing steel subjected to ultrasonic surface rolling processing[J]. Materials science & engineering technology,2023,54(6):667-675.

[80] LIU Z Q,WANG Z,GAO C F,et al. Enhanced rolling contact fatigue behavior of selective electron beam melted Ti6Al4V using the ultrasonic surface rolling process[J]. Materials science and engineering:A,2022,833:142352.

[81] ZHU X T,PAN J Z,LIU D Y,et al. Rolling contact fatigue resistance and damage evolution of carburized bearing steel treated by surface ultrasonic rolling process (SURP)[J]. Wear,2023,524 - 525:204773.

[82] LIU P T,LIN Z L,LIU C P,et al. Effect of surface ultrasonic rolling treatment on rolling contact fatigue life of D2 wheel steel[J]. Materials,2020,13(23):5438.

[83] QU S G,HU X F,LU F,et al. Rolling contact fatigue properties of ultrasonic surface rolling treated 25CrNi2MoV steel under different lubricant viscosities[J]. International journal of fatigue,2021,142:105970.

[84] DUAN C F,QU S G,HU X F,et al. Evaluation of the influencing factors of combined surface modification on the rolling contact fatigue performance and crack growth of AISI 52100 steel[J]. Wear,2022,494-495:204252.

[85] WANG H B,SONG G L,TANG G Y. Enhanced surface properties of austenitic stainless steel by electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling process[J]. Surface and coatings technology,2015,282:149-154.

[86] XIE J W,ZHANG S Q,SUN Y A,et al. Microstructure and mechanical properties of high entropy CrMnFeCoNi alloy processed by electopulsing-assisted ultrasonic surface rolling[J]. Materials science and engineering:A,2020,795:140004.

[87] QU S G,REN Z J,HU X F,et al. The effect of electric aided ultrasonic rolling processing on the microstructure evolution, surface properties, and fatigue properties of a titanium alloy Ti5Al4Mo6V2Nb1Fe[J]. Surface and coatings technology,2021,421:127408.

[88] DUAN C F,QU S G,HU X F,et al. Microstructures and fatigue behaviors of 25CrNi2MoV steel under electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling[J]. International journal of fatigue,2022,158:106733.

[89] WANG H B,SONG G L,TANG G Y. Evolution of surface mechanical properties and microstructure of Ti6Al4V alloy induced by electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling process[J]. Journal of alloys and compounds,2016,681:146-156.

[90] WANG Z,LIU Z Q,GAO C F,et al. Modified wear behavior of selective laser melted Ti6Al4V alloy by direct current assisted ultrasonic surface rolling process[J]. Surface and coatings technology,2020,381:125122.

[91] LIU Z Q,LIU X,LIU R P,et al. Improved rolling contact fatigue performance of selective electron beam melted Ti6Al4V with the as-built surface using induction-heating assisted ultrasonic surface rolling process[J]. Applied surface science,2023,617:155467.

[92] LUAN X S,ZHAO W X,LIANG Z Q,et al. Experimental study on surface integrity of ultra-high-strength steel by ultrasonic hot rolling surface strengthening[J]. Surface and coatings technology,2020,392:125745.

[93] LUO X,REN X P,QU H T,et al. Research on influence of deep cryogenic treatment and ultrasonic rolling on improving surface integrity of Ti6Al4V alloy[J]. Materials science and engineering:A,2022,843:143142.

[94] WANG J T,GE Y,MA Y M,et al. Synergistic effect of the combined surface modification technology on rotational bending fatigue of low carbon alloy steel[J]. Vacuum,2023,212:111993.

[95] WANG J T,QU S G,LAI F Q,et al. Synergistic effects of a combined surface modification technology on rolling contact fatigue behaviors of 20CrMoH steel under different contact stresses[J]. International journal of fatigue,2021,153:106487.

[96] KARIMBAEV R,PYUN Y S,MALEKI E,et al. An improvement in fatigue behavior of AISI 4340 steel by shot peening and ultrasonic nanocrystal surface modification[J]. Materials science and engineering:A,2020,791:139752.

[97] ZHOU Z,YAO C F,TAN L,et al. Experimental study on surface integrity refactoring changes of Ti-17 under milling-ultrasonic rolling composite process[J]. Advances in manufacturing,2023,11(3):492-508.

(编辑　黄崇亚　张璐)